



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **KUULOKKEIDEN EVOLUUTIO MOBIILIAIKAAN**

Vesa Lundbom

PROSESSITEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

Diplomityö

Heinäkuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Kuulokkeiden evoluutio mobiiliaikaan

Vesa Lundbom

Oulun yliopisto, Prosessitekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2021, 64 s + 2 liitettä

Työn ohjaaja yliopistolla: Lehtori Jukka Hiltunen

Kuulokkeiden liitäntäteknologiat ovat olleet muutosvaiheessa viime vuosina useiden mobiililaittevalmistajien jätettyä 3.5 mm kuulokeliitääntä pois mobiililaitteiden lippulaivamalleistaan. Bluetooth-teknologian kehittyminen luotettavaksi ja laadukkaaksi kuulokkeiden liitäntäteknologiaksi on ollut mahdollistamassa tätä mobiililaittevalmistajien ratkaisua. Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia kuulokkeita ja pyrkiä selvittämään kuulokkeiden merkittävimmät ominaisuudet. Pääpaino tutkimuksessa on liikkuvaan elämäntapaan sopivissa monipuolisissa kuulokkeissa. Tutkimuksessa pyritään huomioimaan kuulokkeiden käytön ekologinen näkökulma.

Diplomityön kirjallisuuskatsauksessa perehdytään kuulokkeiden historiaan, kuulokkeiden ääneen ja kuulokkeiden vastamelutekniikkaan. Työssä tutkitaan langallisten nappi- ja sankakuulokkeiden ja langattomien nappi- ja sankakuulokkeiden hintakehitystä vuosien 2017–2021 välisenä aikana. Hintakehitystutkimus toteutettiin keräämällä neljä hintatietoa tarkastelujakson vuotta kohti kullekin kuulokkeelle hintaopas-sivuston kuulokkeiden hintahistoriaa hyödyntäen.

Bluetooth-teknologian kehittymisen myötä Bluetooth-kuulokkeet ovat yleistyneet merkittävästi. Bluetooth-kuulokkeiden yleistymisen johdosta työssä pyritään selvittämään 3.5 mm kuulokeliitännän tulevaisuutta. Suurimman bittinopeuden omaavia äänitiedostoja voi kuunnella vain langallisesti, jonka vuoksi 3.5 mm kuulokeliitääntä on edelleen audiofiilien suosiossa. Teknologian kehittymisen myötä erilaiset Internet-yhteyttä hyödyntävät äänipalvelut ovat yleistyneet. Työssä perehdytään äänenpakkauksen kuulokkeilla kuultavan äänitiedoston äänenlaadun vaikutukseen.

Bluetooth-kuulokkeet saavat yleensä virtansa kuulokkeiden sisällä olevasta akusta. Käytetyin ladattava akkutyyppi on Litium-ioni-akku. Litium-ioni-akku säilyttää täyden kapasiteetin tyypillisesti noin 300–500 latauskerran ajan, kunnes akun kapasiteetti

laskee alle 80 prosentin. Mitä pidempi kuulokkeiden akunkesto sitä pidempi akun elinikä on odotettavissa, sillä silloin akkua joudutaan lataamaan harvemmin. Käyttötavat ja -olosuhteet vaikuttavat merkittävästi kuulokkeiden akkujen elinikään. Kuulokkeille voi olla saatavilla erilaisia varaosia, kuten kuulokkeiden pehmusteita, silikonisovitteita ja äänikaapeleita. Langattomien kuulokkeiden, varsinkin TWS-kuulokkeiden, käyttöiän rajoitteena on kuulokkeiden akun lyhyt elinkaari. Apple ja Podswap tarjoavat Apple AirPods -kuulokkeiden akkujenvaihtopalvelua. Kuulokkeiden akkujen vaihtaminen on ekologista ja vähentää elektronista jätettä.

Kuulokkeita voi ladata USB-C- ja Lightning-liitäntöjen lisäksi langattomasti. Yleensä ladattavalla laitteella on oltava tuki langattomalle lataukselle, jotta langaton lataaminen on mahdollista. Qi on yleisin langattoman lataamisen protokolla. Urbanista julkaisi huhtikuussa 2021 ensimmäiset itsensä lataavat vastamelukuulokkeet. Kuulokkeet hyödyntävät ruotsalaisen Exeger-yrityksen kehittämää Powerfoyle™-teknologiaa. Powerfoyle™-teknologia perustuu uudenlaiseen aurinkokennoteknologiaan, joka muuttaa kaikenlaista valoa puhtaaksi energiaksi.

Tutkimuksissa selvisi, että langallisten nappi- ja sankakuulokkeiden ja langattomien nappikuulokkeiden keskihinnat laskivat hintakehityksen tarkastelujakson aikana. Langattomien sankakuulokkeiden keskihinta nousi tarkastelun aikana. Langattomien sankakuulokkeiden keskihinta olisi laskenut muiden kuuloketyyppien tapaan, mikäli hintakehityksen ajanjaksoa olisi rajattu lyhyemmäksi. Työssä havaittiin, että normaali ihmiskorva ei pysty kuulemaan eroa yli 192kbit/s bittinopeudelle koodatun musiikin ja alkuperäisen analogisen äänen välillä. Työssä tehtyjen huomioiden perusteella Bluetooth-kuulokkeiden suosio tulee kasvamaan entisestään. Työssä selvisi, että TWS-kuulokkeiden elinikää on mahdollista jatkaa vaihtamalla kuulokkeiden akkuja. Kuulokkeiden valmistajien tulisi huomioida akkujen vaihtaminen kuulokkeiden suunnittelussa ja valmistuksessa. Tutkimuksissa saatuja tuloksia voidaan hyödyntää kuulokkeiden suunnittelussa.

*Asiasanat: kuulokkeet, Bluetooth, vastamelukuulokkeet, mobiililaitteet*

# ABSTRACT

The evolution of headphones into mobile age

Vesa Lundbom

University of Oulu, Degree Programme of Process Engineering

Master's thesis 2021, 64 pp. + 2 Appendixes

Supervisor at the university: Jukka Hiltunen

Headphone connection technologies have been in a period of change in recent years, because of many mobile device manufacturers has left the 3.5 mm headphone jack out of their mobile flagship models. The development of Bluetooth technology into a reliably and high-quality headphone connection technology has made this solution possible for mobile device manufacturers. The aim of this thesis is to study headphones and to try to find out the most significant features of headphones. The focus of the study is on versatile headphones suitable for the mobile lifestyle. The study aims to consider the ecological aspect of headphone use.

The literature review of the thesis introduces the history of headphones, the sound of headphones and the active noise cancelling technology of headphones. The study examines the price development of wired in-ear and wired headphones and wireless in-ear and wireless headphones between 2017 and 2021. The price development study was carried out by collecting four price data per year of the study period for each headphone, using the price history of headphones on the Hintaopas website.

With the development of Bluetooth technology, Bluetooth headphones have widespread significantly. Due to the widespread of the Bluetooth headphones, the work aims to find out the future of the 3.5 mm headphone jack. Audio files with the highest bit rate can only be listened to wired, which is why the 3.5 mm headphone jack is still popular with audiophiles. With the development of technology, various audio services utilizing the Internet connection have become more common. The study examines the effect of the sound quality of an audio file heard through the headphones of a sound package.

Bluetooth headphones are usually powered by the battery in the headphones. The most used type of rechargeable battery is a Lithium-Ion battery. A Lithium-Ion battery

typically retains its full capacity for about 300 to 500 charges until the battery capacity drops below 80 percent. The longer the battery life of the headphones, the longer battery life is expected, as the battery will need to be charged less often. Usage habits and conditions of use significantly affect the life of the headphone's batteries. Various spare parts may be available for the headphones, such as headphone pads, silicone fittings, and audio cables. Apple and Podswap provide battery replacement service for Apple AirPods. Replacing headphone batteries is ecological and reduces electronic waste.

In addition to USB-C and Lightning connections, the headphones can be charged wirelessly. Usually, the rechargeable device must have support for wireless charging in order to wireless charging to be possible. Qi is the most common wireless charging protocol. In April 2021, Urbanista released the first self-charging active noise cancellation headphones. The headphones utilize the Powerfoyle™ technology developed by the Swedish company Exeger. Powerfoyle™ technology is based on a new kind of solar cell technology that converts all kinds of light into clean energy.

The study showed that the average prices of wired in-ear headphones and wired headphones and wireless in-ear headphones decreased during the study period. The average price of the wireless headphones increased during the period of study. As with other types of headphones, the average price of wireless headphones would have fallen if the price development period had been limited. It was found that the normal human ear cannot hear the difference between music encoded at a bit rate higher than the 192kbps and the original analog audio. Based on the observations made in work, the popularity of Bluetooth headphones will continue to grow. The work revealed that it is possible to extend the life of TWS headphones by replacing the headphone batteries. Headphone manufacturers should consider battery replacement when designing and manufacturing headphones. The results obtained in the study can be used in the design of headphones.

*Keywords: headphones, Bluetooth, mobile devices, ANC*

# ALKUSANAT

Tämän diplomityön aiheena on kuulokkeet ja niiden ominaisuudet. Työn tarkoituksena on syventyä kandidaatintyössäni nousseisiin mielenkiintoisiin aiheisiin. Työssä käydään lävitse kuulokkeiden historiaa ja jatketaan kandidaatintyössä ollutta kuulokkeiden hintatutkimusta. Lisäksi työssä perehdytään ääneen niin yleisesti kuin kuulokkeiden näkökulmasta sekä vastamelutoimintoon.

Diplomityö on tehty Oulun yliopiston teknillisen tiedekunnan prosessi- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelmassa keväällä 2021.

Työn ohjaajana toimi Jukka Hiltunen Oulun yliopiston teknillisestä tiedekunnasta. Haluaisin kiittää häntä hyvästä ja motivoivasta ohjaamisesta. Tämä on ollut pitkä projekti ja Jukalta on saanut tärkeää tukea työn loppuunsaattamisessa.

Haluaisin kiittää työnantajaani Valkee Oy:ta ja esimiestäni Aki Backmania opintovapaan mahdollistamisesta, joka on edesauttanut tämän pitkän projektin loppuun saattamista. Aki on kannustanut minua opintojeni loppuun saattamisessa.

Lisäksi haluaisin kiittää perhettäni, erityisesti vaimoani ja äitiäni, saamastani tuesta. Haluaisin kiittää myös muita läheisiäni ja ystäviäni tuesta ja kannustuksesta. Haluan kiittää erityisesti koiriani Moskua ja Ukkoa, jotka ovat olleet seuranani työtä tehdessäni ja varmistaneet riittävän ulkoilun työn kirjoittamisen ohessa.

Oulussa, 13.7.2021 Vesa Lundbom

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto .....	1
2 Kuulokkeiden historia .....	3
3 Liitântäteknologiat .....	6
3.1 Langalliset liitântäteknologiat .....	6
3.1.1 3.5 mm kuulokeliitântä .....	6
3.1.2 USB-C-liitântä .....	7
3.1.3 Lightning-liitântä .....	9
3.2 Langattomat liitântäteknologiat .....	9
4 Langalliset kuulokkeet .....	11
5 Langattomat kuulokkeet .....	14
5.1 Sankakuulokkeet .....	16
5.2 Nappikuulokkeet .....	19
6 Ääni .....	21
6.1 Kuulokkeiden ääni .....	22
6.2 Bluetooth-koodekit .....	23
6.3 Äänilähteet .....	26
7 Vastamelutekniikka .....	29
7.1 Vastamelutoiminnon historiaa .....	32
7.2 Vastamelutoiminnon tulevaisuuden näkymät .....	33
8 Hintakehitys 2017-2021 .....	34
9 Akkuteknologia .....	37
9.1 Langaton lataus .....	38
9.2 Kestävä kehitys .....	40
10 Omat kokemukset kuulokkeista .....	42
11 Johtopäätökset .....	45
12 Yhteenveto .....	48
Lähdeluettelo .....	52

LIITTEET:

Liite 1. Kuva kuulokkeiden keskihinnosta

Liite 2. Taulukko kuulokkeiden hintatiedoista



# MERKINNÄT JA LYHENTEET

ADC analogia-digitaalimuunnin (analog-to- digital converter)

ANC aktiivinen melunhallinta (active noise control)

audiofiili henkilö, joka arvostaa musiikin toiston äänenlaatua

DAC laite, jolla digitaalinen signaali muutetaan analogiseksi (digital-to-analog converter)

feedback takaisinkytkentä

feedforward myötäkytkentä

impedanssi kertoo kuinka paljon tehoa kuulokkeet kestävät

koodekki kooderi/dekooderi, jonka läpi digitaalinen ääni kulkee

LE vähän energiaa kuluttava (low energy)

RF radioaalto (radio frequency)

SPL äänenpaineen taso (sound pressure level)

TWS täysin langattomat (true wireless)

# 1 JOHDANTO

Tämä työ on jatkoa Kuulokkeet ja liitäntäteknologiat -kandidaatintyölleni. Tässä työssä käsitellään syvemmin kandidaatintyössä tehtyjä havaintoja ja käydään kuulokkeiden historiaa läpi. Ajatus tälle työlle lähti muutama vuosi sitten nykyisen työnantajani projektista kuulokkeiden liitäntäteknologioihin liittyen. Silloin Apple oli juuri poistanut 3.5 mm kuulokeliitännän uusimmasta matkapuhelinmallistaan ja osa mobiililaittevalmistajista oli seurannut Applen esimerkkiä. Tuolloin selvitin mobiililaitteiden mukana tulevien kuulokkeiden liitäntäteknologioita ja lisensointiin liittyviä asioita. Silloin selvityksen alla oli pääasiassa langalliset liitäntäteknologiat ja niiden yleisyys keskittyen Lightning- ja USB-C-liitäntään. Työkiireet keskeyttivät silloiset tutkimukset, eikä tutkimuksia tullut vietyä loppuun. Kuulokkeiden liitäntäteknologiat aiheena jäi kiinnostamaan minua ja selvitettyäni aiheen olevan edelleen ajankohtainen, aloin tutkimaan aihetta.

Kuulokkeet keksittiin 1800-luvun lopussa ja ensimmäisiä laajassa käytössä olleita kuulokkeita käytettiin puhelinkeskuksissa. Kuulokkeet olivat pitkään lähinnä työkäytössä, kunnes Sony kehitti 3.5 mm kuulokeliitännällä olevan Sony Walkman -korvalappustereon. Korvalappustereoiden suosion myötä muodostui tarve matkakuulokkeille, jonka jälkeen kehitys on jatkunut kiivaana. Matkakuulokkeet ja -äänentoistolaitteet ovat kehittyneet korvalappustereoiden jälkeen merkittävästi digitaalisen äänen ja langattomien teknologioiden myötä. Langallisten liitäntäteknologioiden lisäksi langattomat teknologiat ovat kehittyneet, erityisesti Bluetooth-teknologia.

Kuulokkeiden suosio on kasvanut viimeisten 20 kymmenen vuoden aikana merkittävästi. Kannettavien äänentoistolaitteiden, kuten kannettava CD- ja MP3-soitin, myötä haluamaansa äänimateriaalia on pystynyt kuuntelemaan helposti myös kodin ulkopuolella. 2010-luvun alussa kannettavien media- ja mobiililaitteiden kysyntä kasvoi merkittävästi ja kasvanut kysyntä heijastui myös kuulokkeiden kysynnän kasvuun. (Twice 2011) Research and Markets tekemän tutkimuksen mukaan vuosina 2013–2016 myytiin 580 miljoonaa kuuloketta vuodessa ja tutkimuksessa ennustettiin kuulokkeiden

kysynnän kääntyvän laskuun vuonna 2017 mobiililaittevalmistajien jätettyä kuulokkeet pois myyntipakkauksistaan. (PR Newswire 2016) Kuulokkeiden kysyntä on ennusteista huolimatta jatkanut kasvuaan eikä vuosi 2020 ollut poikkeus jatkumoon COVID-19-pandemiasta huolimatta. Kuulokkeiden kysynnän merkittävin kasvu on siirtynyt langallisista kuulokkeista langattomiin kuulokkeisiin ja langattomien kuulokkeiden kysynnän odotetaan jatkavan kasvuaan myös tulevina vuosina.

Tässä työssä tutkitaan kuulokkeita ja kuulokkeiden liitäntäteknologioita laadullisin menetelmin. Työn tavoitteena on ymmärtää kuulokkeiden ja liitäntäteknologioiden kehitykseen vaikuttavia ilmiöitä ja selvittää syitä kuulokkeiden kasvaneeseen suosioon. Ilmiön tutkimisessa tehtyjen havaintojen perusteella työssä pyritään pohtimaan kuulokkeiden tulevaisuuden näkymiä ja pohtimaan ratkaisuja kestäväen kehityksen näkökulmasta.

## 2 KUULOKKEIDEN HISTORIA

Puhelimen keksimisen jälkeen 1890-luvulla perustettiin puhelinkeskuksia, joissa yhdistettiin puheluita. Puhelinkeskuksissa käytettiin  $\frac{1}{4}$  tuuman puhelinliittimillä liitettäviä kookkaita kuulokkeita. Nämä puhelinkeskuksissa käytetyt kuulokkeet olivat ensimmäiset laajassa käytössä olleet kuulokkeet. (LSTN 2020)

Insinööri Nathaniel Baldwin kehitti keittiössään ensimmäiset nykyaikaisia sankakuulokkeita ulkoisesti muistuttavat kuulokkeet vuonna 1910. (LSTN 2020) Kuulokkeet painoivat noin paunan ollen näin merkittävästi kevyempiä kuin puhelinkeskuksissa käytetyt kuulokkeet. Kuulokkeiden molempiin korvakuulokkeisiin oli liitetty pala kellojousta ja kuulokkeet oli liitetty löyhästi hamppulangalla toisiinsa. Baldwin kehitti Yhdysvaltojen merivoimien kehitystoiveiden mukaisesti korvakuulokkeiden välille nahkaisen pään päälle asettuvan pannan. (Howeth 1963)

John Koss ja Martin Lange kehittivät vuonna 1958 kannettavaa fonografia, johon kuuluisi kuulokkeet. He eivät löytäneet laitteelle sopivia kuulokkeita, sillä kaikki sen aikaiset kuulokkeet olivat tehty sotakoneille ja keskusteluun. Lange kasasi toisen maailmansodan aikaisista kuulokkeista, kuminauhoista, pahvista ja kahdesta pienestä kaiuttimesta stereokuulokkeiden prototyypin. Kuluttajille suunnattujen stereokuulokkeiden myynti käynnistyi Kossin ja Langen kehittämien SP/3-kuulokkeiden myötä. (Pinkerton 2014) Vuonna 1968 Koss julkaisi ESP/6-kuulokkeet, jotka olivat maailman ensimmäiset itsensä energisoivat sähköstaattiset kuulokkeet. 1970-luvulla kolme valmistajaa hallitsivat kuulokemarkkinoita, ne olivat 1947 perustettu AKG, KOSS ja 1945 perustettu Sennheiser. (Weber 2010) Koss jatkoi kehitystyötä ja vuonna 1970 Koss julkaisi Pro/4AA-kuulokkeet. Pro/4AA-kuulokkeita pidetään ensimmäisinä todellisen laajan taajuuden ja korkealaatuisen äänen kuulokkeina, joissa oli vakuuttavat melua eristävät ominaisuudet. Neljä vuotta Pro/4AA-kuulokkeiden julkaisun jälkeen Koss julkaisi HV/1A-kuulokkeet, jotka olivat ensimmäiset dynaamiset kuulokkeet, jotka pystyivät tuottamaan kaikki 10 kuultavaa oktaavia. HV/1A-kuulokkeet ovat olleet henkilökohtaisen kuuntelun suuntaa tekevät kuulokkeet, joihin nykyaikaiset kuulokkeet perustuvat. (Pinkerton 2014)

1960-luvulla Sony julkaisi 3.5 mm kuulokeliitännällä olevan matkaradion, mutta 3.5 mm kuulokeliitäntä tuli laajemmin käytetty vasta vuonna 1979 julkaistujen Sony Walkman-korvalappustereoiden myötä. Korvalappustereoiden suosion myötä tuli tarve kevyille matkakuulokkeille, jotka saisi liitettyä 3.5 mm kuulokeliitántään. Sony Walkman-korvalappustereoiden kanssa myytiin Sennheiserin pehmustetut ja kevytrakenteiset HD 414-kuulokkeet. Sennheiserilla oli patentti avoimiin pehmustettuihin kuulokkeisiin vuoteen 1983 asti, heillä oli kuitenkin lisensointisopimus Sonyn kanssa 1970-luvun lopussa. Sony kehitti Sennheiser HD 414-kuulokkeiden pohjalta minimalistisemmat MDR-3-kuulokkeet. Kevytrakenteisten kuulokkeiden kehitys kävi kiivaana ja vuonna 1984 Koss julkaisi Porta Pro-kuulokkeet, jotka ovat edelleen yhdet maailman suosituimmista kuulokkeista. (Koss 2021)

Walkman-korvalappustereoiden aloittamaa kuuntelutottumuksien muutoksen aikaa kohti mobiilin kuuntelun yleistymistä jatkoi Discman-soitin. Kannettava Discman cd-soitin julkaistiin vuonna 1991 ja se hyödynsi laserteknologiaa levyjen lukemisessa toistaen hifilaatuista ääntä. Mobiilin kuuntelun yleistyminen loi kysyntää matkaan otettaville kuulokkeille. (Weber 2010) CD-soittimet aloittivat digitaalisen äänen leviämisen laajaan mobiilikuuntelukäyttöön, joka mahdollisti helpomman ja luotettavamman tavan kuunnella haluamaansa äänimateriaalia. MP3-soitinten myötä digitaalisen äänen kuuntelu liikkussa levisi entistä laajempaan suosioon.

Kuulokkeita käytettiin aiemmin langallisina, kunnes kehitettiin infrapunateknologiaa hyödyntävät kuulokkeet. Koss julkaisi vuonna 1989 infrapunaa hyödyntävät JCK/300-kuulokkeet, joiden lähetin välitti nelinkertaisen määrän tehoa aiempiin infrateknologiaa hyödyntäviin kuulokesysteemeihin verrattuna. Kandidaatintyössä (Lundbom 2021) kirjoitin, että infrapunateknologialla on lyhyt kantama, matala tiedonsiirto ja sen olevan häiriöaltis esteille. Infrapunateknologiaa hyödyntävien kuulokkeiden lisäksi langatonta teknologiaa hyödynsi RF-teknologiaa käyttävät kuulokkeet. RF-teknologian toimintaperiaatteena lähetin lähettää signaalin ja vastaanotin ottaa signaalin vastaan. RF-teknologian etuna infrapunateknologiaan verrattuna ovat pitkä kantama ja hyvä esteiden sietokyky. RF-teknologian heikkouksia ovat häiriöalttius muille signaaleille, tietoturvattomuus ja matala tiedonsiirtonopeus. Infra- ja RF-teknologia sopivat heikkouksiensa vuoksi huonosti matkakäyttöön. Bluetooth-teknologia liittyi

langattomien teknologioiden joukkoon 90-luvulla tohtori Jaap Haartsenin kehitettyä Bluetooth-standardin 1994. (Lundbom 2021; Koss 2021)

Aluksi lyhyen matkan langattomaan datansiirtoon kehitetyn Bluetooth-standardin kehitti tohtori Jaap Haartsen vuonna 1994. Bluetooth 1.0 -versio tuli laajempaan käyttöön vuonna 1999. Ensimmäiset kuluttajille suunnatut Bluetooth-teknologiaa hyödyntävät hands-free-kuulokkeet tulivat myyntiin 1990-luvun lopussa. Bluetooth-teknologiaa hyödyntävät langattomat stereokuulokkeet tulivat markkinoille 2000-luvun puolivälissä, mutta ne levisivät suurempaan suosioon vasta 2010-luvun alussa. Onkyo julkaisi vuonna 2015 W800 BT-kuulokkeet, jotka olivat maailman ensimmäiset TWS-kuulokkeet. Vuonna 2016 Bora, Apple ja Jabra julkaisivat kukin omat TWS-kuulokkeensa. Bora oli jo aiemmin julkaissut TWS-kuulokkeet, mutta niissä kuulokkeissa oli kuulokkeiden välisiä yhteysongelmia. TWS-kuulokkeet saavuttivat nopeasti suuren suosion ja merkittävänä tekijänä oli Apple poistaessaan 3.5 mm kuulokeliitännän iPhone 7-mobiililaitteestaan. Apple ja monet muut valmistajat ovat kehittäneet TWS-kuulokkeista entistä parempia lisäten kuulokkeisiinsa uusia toimintoja, kuten vastamelutoiminnon. Langattomista Bluetooth-kuulokkeista on tullut varteenotettavia vaihtoehtoja langallisille kuulokkeille. (Loeffler 2020; Swaroop 2020)

## 3 LIITÄNTÄTEKNOLOGIAT

### 3.1 Langalliset liitântäteknologiat

#### 3.1.1 3.5 mm kuulokeliitântä

3.5 mm kuulokeliitântä välittää analogista stereoääntä, joka katkeamatonta ääntä. Kuulokeliitännän kautta välitetyn analogisen äänen vuoksi kytkettävässä laitteessa, kuten mobiililaitteessa, on sisäänrakennettuna digitaaliseen muutokseen ja kuulokkeiden ohjaukseen vaadittavat komponentit. (Triggs 2016) Kandidaatintyössä (Lundbom 2021) kirjoitin, että langalliset 3.5 mm kuulokeliitännällä olevat kuulokkeet tulevat pysymään suosiossa laadukkaana äänen vuoksi. 3.5 mm kuulokeliitännän jatkuvan suosion syy lienee se, että vain langallinen 3.5 mm kuulokeliitântä voi siirtää 24 bittistä ja 48 kHz:stä ääntä tai sitä korkealaatuisempaa ääntä. (Katz 2021b)

Puhelinkeskuksissa käytettiin 1800-luvun lopussa ¼ tuuman puhelinliittimiä, joista 3.5 mm kuulokeliitännän historia juontaa juurensa. Ensimmäinen laite, jossa käytettiin 3.5 mm kuulokeliitântää julkaistiin 1964 Sonyn toimesta. 3.5 mm kuulokeliitântään on olemassa erilaisia plugeja, kuten TS-, TRS- ja TRRS-plugi. TRRS-plugi on useimmiten mobiililaitteiden mukana tuleva 3.5 mm kuulokeliitännän plugi. TRRS-plugi mahdollistaa tasapainoisen ulostulon ja ääniliitännän, siinä on lisäksi mikrofoniominaisuus. (Wells 2016; Headphonesty 2019b; Lundbom 2021)

Sonyn 1979 julkaiseman Walkman -korvalappustereon myötä 3.5 mm kuulokeliitântä levisi laajempaan käyttöön. 3.5 mm kuulokeliitântä toimi pitkään standardina kuulokeliitännälle ja oli muun muassa mobiililaitteiden kuulokeliitântänä, kunnes Apple ilmoitti 2016 poistavansa 3.5 mm kuulokeliitännän iPhone 7 matkapuhelimestaan. Monet muut mobiililaittevalmistajat ovat seuranneet Applen jalan jäljissä ja poistaneet 3.5 mm kuulokeliitännän mobiililaitteistaan. Applen poistettua 3.5 mm kuulokeliitännän uusimmista matkapuhelimistaan vuonna 2020 julkaistuista 23 prosentissa matkapuhelimista ei ole 3.5 mm kuulokeliitântää (Bluetooth Sig 2020b). Klosekin (2018) mukaan lippulaivamallien suosio on niin valtaisa, että todellisuudessa ilman 3.5 mm kuulokeliitântää olevien puhelimien suosio on merkittävästi suurempaa.

Kandidaatintyössä (Lundbom 2021) kirjoitin, että Applen poistettua 3.5 mm kuulokeliitännän mobiililaitteidensa lippulaivamalleista moni muu mobiililaittevalmistaja on seurannut Applen esimerkkiä ja poistanut 3.5 mm kuulokeliitännän mobiililaitteidensa lippulaivamalleistaan. Kandidaatintyössä (Lundbom 2021) havaitulle ilmiölle on nähty myös vastakkaisia ratkaisuja, sillä Peckham (2020) kirjoitti Sonyn palauttavan 3.5 mm kuulokeliitännän keväällä 2020 julkaistavaan Sony Xperia 1 II -matkapuhelimeensa. Sony perusteli päätöstään palauttaa 3.5 mm kuulokeliitännän lippulaivamalliinsa sillä, että heidän mobiililaitteidensa fanit halusivat vaihtoehdon niin langallisten kuin langattomien kuulokkeiden käytölle. (Peckham 2020) Sony julkaisi joulukuussa kompaktin kokoisen 2020 Xperia 5 II -matkapuhelimen ja jatkoi Xperia 1 II -lippulaivamallin linjaa palauttamalla 3.5 mm kuulokeliitännän matkapuhelimeen. (ICT Monitor Worldwide 2020a) LG julkaisi keväällä 2020 lippulaivamallinsa V60 ThingQ -matkapuhelimen, jonka ominaisuuksiin kuului muun muassa 3.5 mm kuulokeliitännä ja 32-bittinen Quad DAC. (ICT Monitor Worldwide 2020b) Toukokuussa 2021 julkaistu Asus Zenfone 8 -matkapuhelin sisältää 3.5 mm kuulokeliitännän toisin kuin sitä edeltävä versio. (Sagar 2021) Sony, LG ja Asus ovat siis poikenneet yleisestä linjasta päätöksillään palauttaa 3.5 mm kuulokeliitännän matkapuhelinten lippulaivamalleihinsa. LG ilmoitti huhtikuussa 2021 sulkevansa matkapuhelinosastonsa, joten tulevaisuudessa 3.5 mm kuulokeliitännän sisältäviä mobiililaitteiden lippulavia malleja valmistanevat Sony ja Asus. (Kashyap 2021)

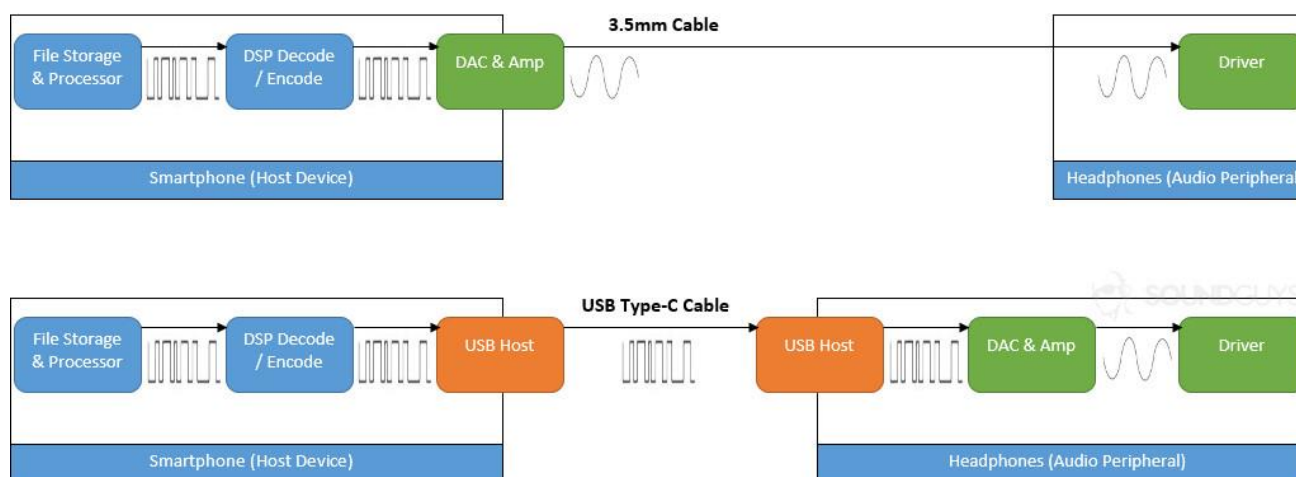
### **3.1.2 USB-C-liitännä**

Vuonna 1996 USB-IF julkaisi USB 1.0 -teknologian, jonka tiedonsiirtonopeus oli 1.5 Mt/s. USB 1.0 -liitännän jälkeen on julkaistu useita versioita, joista USB 3.1-version pohjalta kehitetty USB-C on kuulokkeiden käytön kannalta merkittävä. USB-C-liitännä pystyy välittämään samanaikaisesti dataa ja virtaa, sitä pystyy käyttämään myös digitaalisena äänilitännänä. USB 3.1-versioon pohjautuneella USB-C-liitännällä oli mahdollista saavuttaa 10 Gt/s tiedonsiirtonopeuksia. 2017 lähtien USB-C-liitännä on hyödyntänyt USB 3.2-versiota, jonka tiedonsiirtonopeus voi olla jopa 20 Gt/s. USB-C-liitännä välittää digitaalista äänidataa, jonka kuulokkeet tai muut ulkopuoliset laitteet



muuntavat kaiuttimille välitettäväksi analogiseksi signaaliksi. (Triggs 2016; Lundbom 2021)

USB-C-liitännän virran välittämisen ansiosta kuulokkeet eivät tarvitse erillistä paristoa lisäominaisuuksien, kuten vastamelutoiminnon käyttöön. USB-C-liitäntä on taaksepäin yhteensopiva ja käyttää liittimen analogisia signaaleja välittääkseen stereoääntä kuulokkeisiin. Liitännän kautta välitettävä äänenlaatu on maksimissaan 32 bittistä ja 384 kHz digitaalista ääntä. USB ADC 3.0:n eli USB ääniluokka 3.0:n ansiosta liitännän virrankulutus stereoäänelle on kilpailukykyinen 3.5 mm kuulokeliitännän vastaavan kanssa. USB ADC 3.0 sisältää edelliseen versioon nähden tehokkaamman pakkausvirheen suojauksen vähentäen viiveen vaihtelua ja datahukkaa. (Triggs 2016; Singal 2016; Triggs 2018)



Kuva 1. Kuulokkeiden analogisen 3.5 mm kuulokeliitännän ja USB-C-liitännän datakuvaajat. (Triggs 2018)

Osa mobiililaittevalmistajista toimittaa adapterin, jonka avulla pystyy käyttämään 3.5 mm kuulokeliitännällä olevia kuulokkeita. On olemassa aktiivisia ja passiivisia adaptereita. Aktiivisissa adapterissa on sisäänrakennettu DAC ja adapteri hyödyntää digitaalista ääntä. Siirryttäessä analogisesta äänestä USB-ääneen siirtyvät DAC ja vahvistin matkapuhelimesta kuulokkeiden sisälle. DAC muuntaa digitaalisen signaalin analogiseksi, jotta ääni pystytään toistamaan kuulokkeissa tai kaiuttimissa. Digitaalisista näytteistä tehty tallenne muunnetaan DAC:n toimesta jatkuvaksi analogiseksi

signaaliksi. Äänilähteenä toimivissa analogisen kuulokeliitännän sisältävissä laitteissa, kuten matkapuhelin tai kannettava, on DAC. (Thomas 2021) Passiiviset adapterit käyttävät USB äänen tarviketilaa välittääkseen analogista signaalia mobiililaitteesta. On myös mahdollista käyttää adapteria, jossa on niin USB-C- kuin 3.5 mm kuulokeliitäntä. Kuvassa 1 on analogisen 3.5 mm kuulokeliitännän ja USB-C-liitännän datakuvaajat. Kahden liitännän adaptereissa analoginen signaali kulkee äänekkään virtapiirin ja dataliikenteen vieressä ollen näin altis häiriöille. (Triggs 2018)

### 3.1.3 Lightning-liitäntä

Apple julkaisi Lightning-liitännän hieman aiemmin kuin USB-C-liitäntä julkaistiin. Lightning-liitäntä on käytössä ainoastaan Applen laitteissa, kuten mobiililaitteissa ja tietokoneissa. Teknisiltä ja fyysisiltä ominaisuuksiltaan Lightning-liitäntä on hyvin samanlainen kuin USB-C-liitäntä. Liitännän tekninen kyvykkyys on niin lähellä USB-C-liitännän vastaavaa, että tässä työssä ei syvennyttä Lightning-liitännän teknisiin ominaisuuksiin sen tarkemmin.

Lightning-liitännän tulevaisuuteen liittyen on liikkunut huhuja, että Apple saattaisi olla poistamassa Lightning-liitännän mobiililaitteistaan. Syynä Lightning-liitännän poistamisen huhuille on EU:n halu yhdenmukaistaa kaikkien laitevalmistajien käyttämien laatureiden liitäntäteknologiat ja pienentää näin mobiililaitteiden aiheuttaman jätemäärää. Applen on huhuttu siirtyvän kokonaan langattomaan lataukseen mobiililaitteissaan, joten tulevaisuudessa voisi olla mahdollistua poistaa fyysinen latausportti. (Mccarthy 2020; Lundbom 2021)

## 3.2 Langattomat liitäntäteknologiat

Kandidaatintyössä (Lundbom 2021) kirjoitin, että infrapuna- ja RF-teknologiat ovat sellaisia langattomia teknologioita, jotka tarvitsevat erillisen lähettimen ja vastaanottimen toimiakseen. Totesin kandidaatintyössä (Lundbom 2021) infrapuna- ja RF-teknologioiden sopivan heikosti liikkuvaan elämäntapaan. Bluetooth-teknologia sopii liikkuvaan elämäntapaan toisinkuin infrapuna- ja RF-teknologiat, kuten kandidaatintyössä (Lundbom 2021) havaitsin.

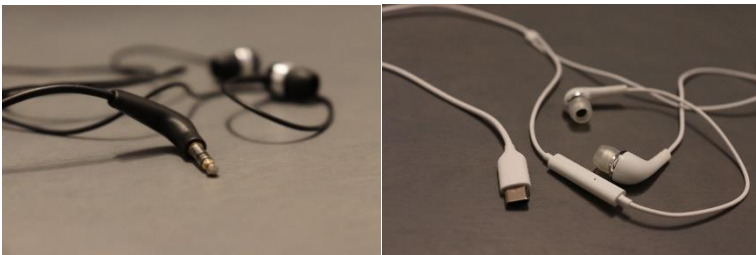
Bluetooth-teknologia kehitettiin alun perin langattomaan datansiirtoon tietokoneiden välillä korvaamaan runsaasti virtaa kuluttava RS-232 standardi. Keksiäkseen tämän avoimen lyhyen matkan langattomien teknologioiden spesifikaation, merkittävimmät matkapuhelin- ja teknologiavalmistajat loivat Bluetooth Special Interest Groupin eli SIG:n vuonna 1988. (Robert 2018; Bluetooth SIG 2020a; Lundbom 2021)

Langattomat laitteet ovat yleistyneet vuosien saatossa ja Bluetooth-teknologiaa on kehitetty aikojen muuttuessa. Bluetooth-teknologian maksimi yhteysnopeus on pysynyt samana Bluetooth 3.0 -versiosta Bluetooth 5.0 -versioon, mutta matalaenerginen LE-teknologia on kehittynyt merkittävästi versioiden välillä. Bluetooth 3.0 -versiossa ei vielä ollut LE-teknologiaa, mutta Bluetooth 5.0 -versiossa LE-teknologian siirtonopeus on 2 Mb/s. Kandidaatintyössä (Lundbom 2021) kirjoitin, että 2020 tammikuussa julkaistiin Bluetooth 5.2 -versio, jossa erityisesti matalaenerginen LE-teknologia kehittyi LE Audion ja sen sisältämän LC3-kodekin myötä. LC3-kodekin avulla on mahdollista toistaa Bluetoothin kautta korkealaatuisempaa ääntä entistä energiatehokkaammin pidentäen laitteiden akunkestoja. Kandidaatintyössä (Lundbom 2021) mainitsin LE Audion sisältävän tuen kuulolaitteille ja tuovan etuja esimerkiksi TWS-kuulokkeiden tekniseen toteuttamiseen. (Bluetooth SIG 2019; Bluetooth SIG 2020c; Lundbom 2021)

Bluetooth SIG:n 2021 markkinakatsauksen mukaan vuonna 2020 myytiin 1,1 miljardia Bluetooth -äänilaitetta. Ennusteen mukaan myytyjen äänilaitteiden määrän odotetaan kasvavan vuosittain 8 % 2025 asti, jolloin ennustetaan myytävän 1,7 miljardia äänilaitetta. Bluetooth-kuulokkeet ovat suurin Bluetooth-äänilaitteiden ryhmä. Vuonna 2021 Bluetooth-kuulokkeita ennustetaan myytävän 633 miljoonaa kappaletta. Vuonna 2020 Bluetooth -nappikuulokkeita myytiin 152 miljoonaa kappaletta ja niitä ennustetaan myytävän 521 miljoonaa kappaletta vuonna 2025. Nappikuulokkeiden vuosittaisen myynnin ennustetaan kasvavan 3.4 kertaiseksi vuodesta 2021 vuoteen 2025. (Bluetooth SIG 2021a)

## 4 LANGALLISET KUULOKKEET

Kuulokkeet otettiin langallisina käyttöön jo 1800-luvun lopulla puhelinkeskuksissa, kuulokkeet liitettiin silloin ¼ tuuman puhelinliittimillä. Puhelinkeskuksissa käytetyt kuulokkeet olivat ensimmäiset laajassa käytössä olleet kuulokkeet. (LSTN 2020) 1960-luvulla Sony julkaisi 3.5 mm kuulokeliitännällä olevan matkaradion, mutta 3.5 mm kuulokeliitäntä tuli laajemmin käytetty vasta vuonna 1979 julkaistujen Sony Walkman-korvalappustereoiden myötä. (Koss 2021) 2010-luvulla Apple julkaisi digitaaliset Lightning-liitännän ja USB-IF julkaisi USB-C-liitännän. Lightning- ja USB-C-liitännät erosivat analogisesta 3.5 mm kuulokeliitännästä merkittävästi, sillä niin Lightning- kuin USB-C-liitäntä oli digitaalinen liitäntä ja molemmat mahdollistivat samanaikaisesti latauksen ja datansiirron. 2010-luvun lopulla Apple jätti mobiililaitteiden lippulaivamalleistaan 3.5 mm kuulokeliitännän pois ja muut valmistajat seurasivat perässä. Yleisessä käytössä kuulokkeiden langallisista liitännöistä käytössä ovat 3.5 mm kuulokeliitäntä, Lightning-liitäntä ja USB-C-liitäntä sekä lähinnä peli- ja headset-kuulokkeilla tietokone- tai konsolikäytössä USB-A-liitäntä. Kuvassa 2 on nappikuulokkeet 3.5 mm kuuloke- ja USB-C-liitännällä.



Kuva 2. Langalliset nappikuulokkeet 3.5 mm kuuloke- ja USB-C-liitännällä.

Sankakuulokkeet ovat se kuuloketyyppi, josta kuulokkeet ovat saaneet alkunsa. Tässä työssä sankakuulokkeista puhuttaessa tarkoitetaan sellaisia sankakuulokkeita, joiden sanko on suunniteltu pään päälle laitettavaksi ja kuulokeosat on suunniteltu tulevan korville. Sankakuulokkeita on usean tyyppisiä ja yleisimmät tyypit ovat kokonaan korvat peittävät over-ear-kuulokkeet ja korvien päälle tulevat on-ear-kuulokkeet. Käsiteltäessä sankakuulokkeita jatkossa työssä ei tulla erittelemään kuuloketyyppejä, vaan molemmat kuuluvat sankakuulokkeiden alle.

Sankakuulokkeisiin kiinnittää helposti huomiota niin käyttäessä julkista liikennettä kuin ulkoillessa. Sankakuulokkeita on olemassa niin langallisina kuin langattomina versioina ja molemmilla on olemassa laajat käyttäjäkunnat. Langallisena versiona kuulokkeita voi saada analogisena 3.5 mm kuulokeliitännällä, USB-C-liitännällä, Lightning-liitännällä ja toimistokäyttöön USB A-liitännällä. 3.5 mm kuulokeliitännällä olevien langallisten kuulokkeiden etuna on se, että analoginen liitäntä mahdollistaa häviöttömän äänentoiston, jonka vuoksi 3.5 mm kuulokeliitäntä on suosittu varsinkin audiofiilien ja studioiden käytössä. 3.5 mm kuulokeliitännän heikkous on toisaalta se, että mobiililaitteiden lippulaivamalleista ja uusimmista kannettavista tietokoneista on jätetty kyseinen kuulokeliitäntä pois. Tästä syystä 3.5 mm kuulokeliitäntä voi rajoittaa kuulokkeiden käyttöä, mikäli on tarkoituksena käyttää kuulokkeita monipuolisesti eri laitteilla. (Lundbom 2021)

On olemassa myös muunlaisia langallisia kuulokkeita kuin sankakuulokkeita, kuten nappikuulokkeita, luujohdekuulokkeita, headset-kuulokkeita, TV-kuulokkeita ja pelikuulokkeita. Luujohdekuulokkeisiin ei tulla syventymään tässä työssä sen suuremmin, sillä ne ovat toteutukseltaan ihan erilaiset kuin muut työssä käsiteltävät kuuloketyypit. Nappikuulokkeissa yksi yleisimmistä kuuloketyypeistä on niin sanotut in-ear- eli tulppakuulokkeet, joissa kuulokesovitin tulee tiiviisti korvakäytävän suulle toimien passiivisena melunpoistajana, jolloin toistettu ääni kuuluu selvästi. In-ear-kuulokkeiden lisäksi on sellaisia langallisia nappikuulokemalleja, kuten pisara-, nappi- ja urheilunappikuulokkeet. (Verkkokauppa.com 2021)

USB-C- ja Lightning-liitännät ovat digitaalisia liittimiä, ja niillä on mahdollista siirtää

samanaikaisesti dataa ja virtaa. Kyseisillä liitimillä varustetuissa kuulokkeissa on siis mahdollista toteuttaa myös lisäominaisuuksia, kuten vastamelutoiminto, ilman kuulokkeiden sisäistä paristoa. USB-C-liitäntä on nykyään laajimmin levinnyt liitäntä ja se löytyy useimmista mobiililaitteista, kannettavista tietokoneista ja pöytäkoneista. Lightning-liitäntä on Applen kehittämä liitäntä, joka on käytettävissä vain Applen laitteiden kanssa. Tekniseltä toteutukseltaan ja muotoilultaan USB-C- ja Lightning-liitännät ovat hyvin samankaltaisia. (Lundbom 2021)

Langallisten kuulokkeiden etuna on niiden vaivaton käyttö, kun kuulokkeet kytketään haluttuun äänilähteeseen esimerkiksi mobiililaitteeseen ja kuunnellaan. Langalliset kuulokkeet ovat myös huolettomia käytössä, sillä niissä ei ole yleensä ladattavaa akkua, jonka vuoksi kuulokkeet ovat aina käytettävissä. Osa mobiililaittevalmistajista on palauttanut 3.5 mm kuulokeliitännän uusimpiin lippulaivamalleihinsa poistettuaan sen aiemmista mobiililaitemalleistaan seurattuaan Applen esimerkkiä. 3.5 mm kuulokeliitännästä on siis tullut mobiililaitteiden ominaisuus, jolla erottaudutaan joukosta hyvin kilpailuilla markkinoilla. Tämä erottautuminen on hyvä uutinen analogisen 3.5 mm kuulokeliitännän ystäville ja myös ihmisille, jotka ovat hiljattain panostaneet laadukkaisiin kyseisellä kuulokeliitännällä oleviin kuulokkeisiin. (Zahran 2020) On olemassa myös kuulokkeita, joilla langallinen kuuntelu on mahdollista niin 3.5 mm kuulokeliitännän kuin USB-C-liitännän kautta. Sellaisia kuulokkeita ovat muun muassa Shure AONIC 50 Wireless, Jabra Evolve2 65 Wireless, Sennheiser Momentum 3 Wireless ja Bowes & Wilkins PX5 Wireless. (McCuaig 2021)

Kandidaatintyössä (Lundbom 2021) taulukko 2. sivulla 18 on koottuna hintatutkimuksessa keräämieni langallisten kuulokkeiden hintatietoja. Hintatutkimuksen perusteella ainoastaan TV-kuulokkeet maksavat halvimmillaan yli 10 euroa. Liikkuvan elämäntavan kannalta mielenkiintoisimpien kuuloketyyppien eli nappi- ja sankakuulokkeiden mediaanihinnat olivat 30 euroa ja 50 euroa. Hintatutkimuksessa selvisi, että langallisissa kuulokkeissa on myös varsin korkeita maksimihintoja Hifi-kuulokkeista johtuen. Hintatutkimuksessa kerättyjen hintatietojen perusteella on todettavissa, että langallisten kuulokkeiden etuna vaivattomuuden ja huolettomuuden lisäksi on niiden edulliset hinnat.

## 5 LANGATTOMAT KUULOKKEET

Teknologian kehittyminen on ollut osaltaan vaikuttamassa työ- ja opiskelukulttuurin muutokseen, sillä teknologian kehittymisen myötä paikasta rippumaton työskentely on tullut varteenotettavaksi mahdollisuudeksi. Viime vuosina langattomien yhteyksien, nykyaikaisten laitteiden ja tiedonhallintaohjelmistojen ansiosta työskentely on mahdollista niin toimistolla, kotona kuin esimerkiksi junassa. Kuulokkeet ovat yksi merkittävä tekijä työskentelyssä, sillä ne sulkevat ulkopuolisia ääniä ja helpottavat siten keskittymistä, lisäksi kuulokkeilla voi hoitaa puheluita ja osallistua videopalaveriinhin muita häiritsemättä. Yksilöt omistavat nykyään useampia Bluetooth -äänilaitteita, kuten kuulokkeita. Useampien kuulokkeiden omistamisen taustalla on kasvussa oleva tarve käyttötilanteen ja -tarpeen mukaan suunnitelluille Bluetooth -äänilaitteille. Tällaisia erilaisiin käyttötilanteisiin ja -tarpeisiin suunniteltuja kuulokkeita ovat esimerkiksi urheilu- ja pelikuulokkeet. (Bluetooth SIG 2021a)

Pelikuulokkeita on niin langallisia kuin langattomia, kuulokkeita yhdistää keskustelua varten oleva mikrofoni. Bose on tunnettu laadukkaiden kuulokkeiden valmistaja, joka valmistaa kuulokkeita moniin erilaisiin käyttötarpeisiin. Bose julkaisi syksyllä 2020 QuietComfort 35 II Gaming Headset -pelikuulokkeet, jotka ovat Bosen ensimmäiset pelikuulokkeet. QC 35 II -kuulokkeisiin liitetään irrotettava pelimoduuli, jossa on taustamelua hylkivä mikrofoni. Pelikuulokkeiden lisäksi kuulokkeiden mukana toimitetaan kuulokkeiden PC-ohjain, jolla voi hienosäätää kuulokkeiden ja mikrofoniin ääniä. (Fisher 2020a) QC 35 II Gaming Headset -pelikuulokkeiden vastamelutoiminto on käytettävissä myös pelatessa, mutta kuulokkeiden heikkoutena irrotettavan pelimoduulin toimiminen vain langallisesti. Kun irrotettava moduuli on irrotettu, QC 35 II Gaming Headset -kuulokkeet toimivat aivan normaalisti Bluetooth -vastamelukuulokkeina. Pelimoduulia ei ole saatavilla erikseen jo olemassa oleville kuulokkeille. (Moore 2021) Kuulokkeista, joissa on 3.5 mm kuulokeliitäntä voi tehdä langalliset pelikuulokkeet erikseen ostettavalla 3.5 mm kuulokeliitäntään liitettävällä irrotettavalla mikrofonilla. Näin jo aiemmin ostettuja kuulokkeita voi käyttää pelikuulokkeina ilman tarvetta hankkia kokonaan erillisiä pelikuulokkeita. (Bowe 2021)



Kuva 3. Langattomat sanko-, TWS- ja nappikuulokkeet.

Langattomien kuulokkeiden tyypillä on suuri vaikutus kuulokkeiden sisälle mahtuvan akun kokoon ja akunkestoon. Kuvassa 3 on sanko-, nappi- ja täyslangattomat kuulokkeet. Kuvasta 1 voi havaita sankakuulokkeiden kuulokeosan huomattavasti muita kuulokkeita suuremman koon. Niskapantamallisten nappikuulokkeiden niskapantaan mahtuu hieman pienempi akku kuin sankakuulokkeisiin ja täyslangattomiin kuulokkeisiin mahtuu kaikista pienin akku. Kuulokkeiden akunkestoon vaikuttaa akun koon lisäksi merkittävästi kuulokkeiden käyttämä Bluetooth-versio ja kuulokkeiden tekniset ominaisuudet.

Taulukosta 1 nähdään erilaisten langattomien kuulokkeiden ja TWS-kuulokkeiden latauskoteloiden akunkestotietoja. Taulukosta 1 nähtävien akunkestotietojen perusteella voidaan sanoa, että akunkestoissa on suurta vaihtelua niin kuuloketyyppien välillä kuin kuuloketyyppien sisällä. Noin vuorokauden eli 24 tunnin akunkesto vaikuttaisi olevan hyvä normaali sankakuulokkeille ja TWS-kuulokkeille latauskotelon kera. Nappikuulokkeiden keskuudessa akunkeston vaihtelu on suurta ja kuuloketyyppi on suuri vaikutus akunkestoon, sillä niskapantakuulokkeissa on merkittävästi suurempi akku kuin esimerkiksi perinteisissä langattomissa nappikuulokkeissa.



Kuuloketyyppi	Akunkeston keskiarvo	Akunkeston mediaani	Akunkeston minimi	Akunkeston maksimi
Nappikuulokkeet	9,7	8	4	40
Sankakuulokkeet	25,6	24	5	80
TWS-kuulokkeet	5,9	6	3	11
TWS-kuulokkeiden latauskotelo	18,7	17	3,5	75
TWS-kuulokkeet ja latauskotelo	23,1	21	10	80

Taulukko 1. Langattomien kuulokkeiden akunkestoja. (Lundbom 2021)

Kuulokkeiden sovellukset tarjoavat useita erilaisia mahdollisuuksia kuulokkeiden käyttöön. Osa kuulokevalmistajista tarjoaa Bluetooth-kuulokkeilleen sovelluksia, joiden avulla kuulokkeita voi säätää haluamallaan tavalla. Esimerkiksi Jabralla on Sound+ -sovellus, joka on suunniteltu äänen yksilöintiä varten. Sound+ -sovelluksella voi valita HearThrough-teknologian avulla, kuinka paljon ulkomaailmasta kuuluu läpi. Sovelluksella on MySound-toiminto, jolla musiikintoisto optimoidaan ja määritetään käyttäjän kuuloprofiilin mukaiseksi. Lisäksi Sound+ -sovelluksella voi hienosäätää kuulokkeita muokattavan taajuuskorjaimen avulla. (Jabra 2021)

## 5.1 Sankakuulokkeet

Langallisten sankakuulokkeiden lisäksi on olemassa langattomia sankakuulokkeita. Langattomat kuulokkeet tulivat koteihin tv-kuulokkeiden merkeissä jo 1980-luvulla, langattomuus toteutettiin infrapunateknologialla. TV-kuulokekäyttöön infrapunateknologia on sopiva langattoman kuuntelun teknologia, sillä kuunteluetaisyys on melko lyhyt ja esteetön. Mikäli etäisyys kasvaa suuremmaksi tai kuulokkeiden ja lähettimen väliin tulee esteitä, niin infrapunateknologia ei ole toimiva ratkaisu. RF-teknologia mahdollistaa paremman kuuluvuuden kuunteluetaisyyden kasvaessa eikä yhtä herkkä kuulokkeiden ja lähettimen välisille esteille kuin infrapunateknologia. Liikuttaessa paikasta toiseen haluttaessa kuuntelukokemuksen pysyvän koko ajan hyvänä infrapuna- ja RF-teknologiat eivät ole tilanteeseen sopivia langattomia tekniikoita. (Lundbom 2021)



Kuva 4. Langattomat sankakuulokkeet.

Bluetooth-teknologian energiatehokas yhteys on mahdollistanut vakaan yhteyden ja laadukkaan äänentoiston lisäksi erilaisten kuulokkeiden lisäominaisuuksien lisäämisen kuulokkeisiin. Kuvassa 4 on vastamelutoiminnon omaavat Bluetooth-kuulokkeet. Vastamelutoiminto on yksi merkittävimmistä ja suosituimmista lisäominaisuuksista, joka on yleistynyt kuulokkeiden ominaisuutena. Mikrofoni on ollut useissa kuulokkeissa mahdollistamassa esimerkiksi puheluiden puhumisen kuulokkeilla sopien näin hyvin liikkuvaan elämäntapaan ja vapauttaen kädet työnteolle. Nykyään kuulokkeissa voi olla useita laadukkaita mikrofoneja, jotta puheääni kuuluu mahdollisimman hyvin. Etäpalaverien ja -työskentelyn yleistyttyä kuulokkeille laadukkailla mikrofoneilla on kysyntää, sillä käytettäessä kuulokkeita etäpalaveriin pystyy osallistumaan muita häiritsemättä.

Useissa langattomissa sankakuulokkeissa on 3.5 mm kuulokeliitäntä, jotta kuulokkeita on mahdollista käyttää akun loppuessa langallisina kuulokkeina. Langallisina kuulokkeina toimimisen ansiosta kuulokkeet toimivat myös sellaisten laitteiden kanssa, joissa ei ole Bluetooth-liitäntää. Kuulokkeiden lataus tapahtuu yleensä USB-liitännän välityksellä, uusimmissa kuulokemalleissa USB-C-liitännän välityksellä. Lisäksi USB-C-liitäntää käytetään osassa kuulokkeista kuunteluun, jolloin myös kuulokkeiden lisäominaisuudet, kuten vastamelutoiminto ja mikrofoni, ovat käytettävissä. Käytettäessä 3.5 mm kuulokeliitäntää langattomien sankakuulokkeiden kanssa kuulokkeiden lisäominaisuudet eivät usein ole käytettävissä, jos kuulokkeiden akku on loppussa.

Pitkään sankakuulokkeita tehtiin omat kuhunkin erilaiseen käyttötilanteeseen, kuten pelikuulokkeet pelaamiseen, TV-kuulokkeet television katsomiseen ja headset-kuulokkeet toimistokäyttöön. Laajalle levinneestä käytössä olleet Bluetooth-kuulokkeet eivät ole mittavasta käytettävyydestään huolimatta sopineet äänimateriaalin kuuntelun lisäksi esimerkiksi pelikäyttöön. Tästä syystä eri käyttötarpeisiin on vaadittu erilaisia kuulokkeita. Jossain vaiheessa suosittuihin langattomiin sankakuulokkeisiin julkaistiin lisäosana liitettävä mikrofonia, jolla laadukkaista kuulokkeista saadaan hyvät kuulokkeet niin peli- kuin toimistokäyttöä varten. Muutos luo mahdollisuuden käyttää samoja kuulokkeita laajemmassa käytössä ja poistaa tarpeen hankkia useita kuulokkeita eri käyttötarpeisiin.

## 5.2 Nappikuulokkeet

Langattomia nappikuulokkeita on useanlaisia, joista kolme yleisintä mallia ovat nappi-, niskapanta- ja TWS-kuulokkeet. Nappikuulokkeet ovat yhteyksissä toisiinsa kuulokejohdon kautta. Niskapantakuulokkeiden korvanapit ovat kuulokejohdoilla yhteyksissä niskapantaan, kuten kuvassa 5 näkyy. Niskapannalliset nappikuulokkeet ovat kooltaan hieman suuremmat kuin muut langattomat nappikuulokemallit, jonka vuoksi niskapantojen koteloihin mahtuu suuremmat akut kuin muihin langattomiin nappikuulokkeisiin. TWS-kuulokkeet ovat täysin langattomat kuulokkeet ja ne yhdistyvät äänilähteeseen Bluetooth-teknologiaa hyödyntäen. TWS-kuulokkeet myydään usein latauskoteloidessa, joilla voi ladata TWS-kuulokkeita jopa useita kertoja.



Kuva 5. Langattomat nappikuulokkeet niskapannalla.

Langattomat nappikuulokkeet kulkevat kompaktin kokonsa vuoksi helposti mukana. Kompaktin koon ja langattomuuden ansiosta osa kuulokkeista on pystytty suunnittelemaan niin tiiviiksi, että kuulokkeet voivat olla hien-, -veden- tai pölynkestäviä. IP-luokitus kertoo miten hyvin kuulokkeet sietävät vettä, suolaa ja pölyä. Mikäli kuulokkeita on tarkoitus käyttää esimerkiksi urheiluun on hyvä varmistaa, että kuulokkeiden IP-luku on mahdollisimman hyvä. IP-luokituksessa ensimmäinen luku kertoo pölynsietokyvyn ja toinen luku kertoo vedenkestävyyden. Mitä suurempi luku, niin sitä paremmin kuulokkeet kestävät pölyä tai vettä. Mikäli kuulokkeiden IP-tekstin jälkeen on heti X-kirjain, niin kuulokkeet eivät ole pölynkestävät. IPX4-luku tarkoittaa, että kuulokkeet ovat roisketiiviit jokaisesta suunnasta. (Bowe 2020)

Langattomista nappikuulokkeista suosituin kuulokemalli on TWS-kuulokkeet eli täysin langattomat kuulokkeet. Kuvassa 6 olevat TWS-kuulokkeet ovat Samsung Galaxy Buds-kuulokkeet ja niiden latauskotelo. TWS-kuulokkeiden kysyntä kasvoi Counterpointin tutkimuksen mukaan vuonna 2020 78 % ja kysynnän ennustetaan kasvavan 33 % vuonna 2021, saavuttaen 310 miljoonan kuulokkeen myynnin. Counterpointin tekemästä tutkimuksesta selviää, että vuonna 2020 Applella oli 31 % markkinaosuus TWS-kuulokkeiden kappalemääräisestä myynnistä, kun Xiaomilla oli 9 %, Samsungilla 7 % ja JBL:llä 4 % markkinaosuus. Applen markkinaosuuden 27 % vuonna 2021 Xiaomin, Samsungin ja JBL:n säilyttäessä osuutensa samana, muiden valmistajien markkinaosuuden kasvaessa vuodesta 2020. Matala- ja keskihintaisten kuulokkeiden kysynnän kasvun odotetaan Counterpointin tutkimuksessa jatkavan suurta kasvua, mutta korkealaatuisten TWS-kuulokkeiden myynnin ennustetaan kasvavan vasta Applen ja muiden tunnetuimpien valmistajien julkaistessa uudet TWS-kuulokkeiden mallinsa. (Lee 2021)



Kuva 6. Täysin langattomat kuulokkeet ja latauskotelo.

## 6 ÄÄNI

Ääni on aaltoliikettä, joka leviää aina väliaineen kautta. Ääni etenee kaasuissa pitkäikäisenä aaltoliikkeenä, eli paineen tiheytyminä ja harventumina. Kiinteissä aineissa ääni voi myös esiintyä poikittaisena aaltoliikkeenä, joka voidaan havainnoida kiinteän aineen värähtelynä kohtisuorassa kappaleeseen nähden. Paineiden tiheytymien suuruutta kuvaa amplitudi, joka vaikuttaa kuultavan äänen suuruuteen. Kun aaltoliikkeen tiheytyvät ohittavat tietyn kiinnitetyn paikan sekunnissa, sitä kutsutaan taajuudeksi (Hz). (Metsäranta 2020)

Kullakin aallolla on huippu ja laakso, jota kutsutaan kierrokseksi, ja sitä kuinka monta kierrosta sekunnissa kutsutaan taajuudeksi. Taajuus ilmoitetaan näkyvällä Hz -merkinnällä. Mitä korkeampi taajuus, sitä korkeampi nuotti. (Metsäranta 2020) Ääntä kuvataan usein selvyiden vuoksi ylös ja alas liikkuvalla aaltomuodolla, vaikka se on todellisuudessa paineenvaihteluiden aiheuttamaa, pitkäikäisyyttä aaltoliikettä. Korvalla on kyky kuulla todella hiljaisia ja todella kovia ääniä. Äänenvoimakkuuksia mitataan yleensä logaritmisella desibeliasteikolla (dB), jossa mitta-asteikko kasvaa eksponentiaalisesti. Desibeli on vertailuyksikkö, joka kertoo kahden arvon keskinäisen suhteen. Eri käyttötarkoituksissa nollassa määritellään eri tavoin. Akustisen äänen voimakkuuksia mitattaessa käytetään yleensä dB SPL-asteikkoa, jossa "0 dB SPL" vastaa ihmisen kuulokynnystä keskitaajuuksilla. (Harju 2021a)

Kun audiosignaali on analogista, se vastaa periaatteessa yksi yhteen alkuperäistä ääntä, sillä erotuksella, että ilmapaineen värähtely on muutettu sähköiseksi aaltoliikkeeksi. Analogista signaalia muokataan ja vahvistetaan sähköisillä virtapiireillä, ja mitä useamman laitteen läpi signaali kulkee sitä enemmän, se vääristyy ja kerää mukaansa kohinaa. Digitaalinen audiosignaali on numeraalinen mallinnus alkuperäisestä äänestä tai analogisesta audiosignaalista. Kun signaali digitoidaan, se muutetaan numeroarvoiksi. Mitä tarkemmin signaali voidaan mitata ja mitä enemmän numeroita on käytössä, niin sitä tarkempi mallinnus voidaan tehdä. (Harju 2021b)

## 6.1 Kuulokkeiden ääni

Ihmiset pystyvät yleensä kuulemaan äänet 20Hz – 20 000Hz kuuloalueella. Myös korkeampia ääniä on mahdollista kuulla, jos SPL on riittävän korkea. Ihmisten kuultavan SPL:n laajuus on 0 dB:stä noin 130 dB:iin, 1 dB:n tarkkuudella. (Vapalahti 2020) Kuulokkeet valmistetaan yleensä sopimaan ihmisten kuuloalueeseen, joten tavalliselle käyttäjälle kuuloalueella ei ole suurta merkitystä. Kuulokkeiden taajuusvaste sen sijaan on hyvin merkittävä, sillä se määrittää äänenkuvan. (Matija 2019)

Kuulokkeiden yhteydessä ilmoitetaan usein kuulokkeiden impedanssi. Käytettäessä kuulokkeita mobiililaitteella tai kannettavalla tietokoneella on hyvä hankkia matalan noin 16–32 Ohmin impedanssin omaavat kuulokkeet. Mikäli kuulokkeiden impedanssi on hyvin korkea, niin kuulokkeiden käyttöön tarvitaan erillinen kuulokevahvistin. Impedanssi ei vaikuta suoraan äänenlaatuun, vaan vaikuttaa äänenvoimakkuuteen. Mikäli kuulokkeiden impedanssi on liian korkea esimerkiksi mobiililaitteelle, laite ei toista ääntä riittävän korkealla äänenvoimakkuudella. (Vapalahti 2020)

Kuulokkeilla kuullun äänen äänenlaatuun vaikuttaa käytetty liitântäteknologia, sillä langallisesti kuunneltuna on mahdollista kuunnella ääntä analogisena 3.5 mm kuulokeliitännän kautta, kun taas langattomasti kuunneltuna ääni siirretään yleensä Bluetooth-yhteyden välityksellä. Äänen siirtäminen Bluetooth-yhteyden välityksellä tapahtuu koodekkeja hyödyntäen. Uusimmissa Bluetooth -versioissa on tuki useille erilaisille koodekeille, äänen pakkaustavoille, ja parhaimmat koodekit kykenevät myös häviöttömän äänen välittämiseen. Ratkaisevaa koodekeiden käytössä on, että niin kuulokkeissa kuin äänilähteenä toimivassa laitteessa on tuki halutulle koodekille. Ei riitä, että vain toisessa laitteessa on tuki halutulle koodekille Bluetooth -version ja tuettujen koodekien lisäksi merkittävää on niin kuulokkeiden laatu kuin toistettavan lähdemateriaalin laatu. Nykyään lähdemateriaalia nautitaan usein erilaisista pilvipalveluista, kuten Spotify, Youtube ja äänikirjapalvelut, joiden kautta saatavaan äänenlaatuun voi vaikuttaa vain rajallisesti. Esimerkiksi Spotify tarjoaa ilmaiseksi maksimissaan noin 160 kbit/s äänenlaatua mobiililaitteille, kun maksullisella Spotify Premium -jäsenyydellä voi nauttia noin 320 kbit/s äänenlaadusta. (Spotify 2021)

## 6.2 Bluetooth-koodekit

Äänenpakkaus on merkittävässä roolissa kuulokkeilla kuunneltavan materiaalin äänenlaatuun. Pienempi bittinopeus ei välttämättä aina kuulosta huonommalta, eikä suurempi bittinopeus kuulosta aina paremmalta. Digitaalisen äänen pakkaamisesta on monessa muodossa pilvipalveluista striimatuista tiedostoista Bluetooth -kuulokkeisiin lähetettyyn dataan. Suurin osa äänenpakkaus koodekeista on häviöllisiä eli niistä poistetaan jotain tietoa. Tiedon poistamisella ei ole välttämättä vaikutusta kuultavaan äänenlaatuun, jos poistettu tieto olisi joka tapauksessa kuulon havaitsemattomissa. Pakkauksen jälkeen tiedosto dekoodataan käänteisellä koodekillä, kun haluat kuunnella sitä. MP3, AAC ja OOG ovat tiedostomuotoja, jotka pakataan psykoakustisesti eli poistaen ne osat mitä ei kuulisi muutenkaan. Psykoakustisten koodekkien lisäksi on olemassa häviöllisiä reaaliajan koodekkeja ja häviöttömiä koodekkeja. Taulukossa 2 on yleisimpien koodekkien näytetaajuuksia, bittinopeuksia ja -syvyyksiä. (Triggs 2020)

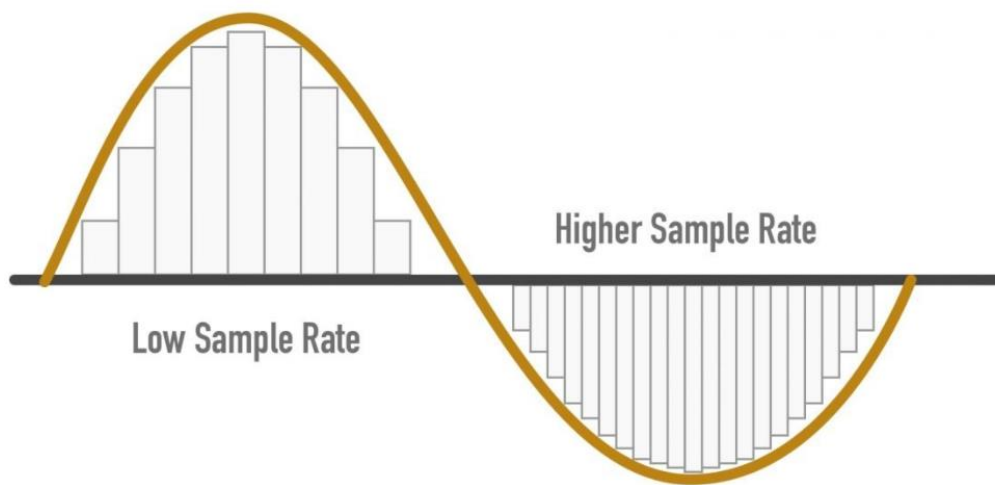
Koodekki	Maksimi näytetaajuus	Bittinopeus	Bittisyvyys
AAC	44,1 kHz	320 kbit/s	24 bittiä
SBC	48 kHz	345 kbit/s	16 bittiä
aptX	48 kHz	384 kbit/s	16 bittiä
aptX HD	48 kHz	576 kbit/s	24 bittiä
aptX Low Latency	44,1 kHz	352 kbit/s	16 bittiä
aptX Adaptive	48 kHz	280–420 kbit/s	16 ja 24 bittiä
LC3	48 kHz	345 kbit/s	8, 16 ja 32 bittiä
MP3	44,1 kHz	320 kbit/s	ei ole
LDAC	96 kHz	330, 660, 990 kbit/s	24 bittiä
ALAC	384 kHz	1411 kbit/s	16, 24 ja 32 bittiä
FLAC	655,35 kHz	1411 kbit/s	24 bittiä
Samsung Scalable Codec	96 kHz	88–512 kbit/s	24 bittiä

Taulukko 2. Koodekkien näytetaajuuksia, bittinopeuksia ja bittisyvyyksiä. (Katz 2021b; Matija 2019; Sony 2020; Burns et al 2021; Triggs 2020; Gleeson 2021; Triggs 2021; Samsung 2020; Daisy 2021; Harris 2019; Calabrese 2021)



Reaaliajan äänikoodekit, kuten Bluetooth SBC, aptX ja LDAC, käyttävät yleensä kohinan muotoilua pakkausmuotona, koska se on nopeampaa ja se voidaan tehdä pienemmällä viiveellä. Tällaiset pakkausmuodot hyödyntävät korvien herkkyyttä pakkausta optimoidessaan, mutta eivät ole sisältökeskeisiä, kuten psykoakustiset pakkausmuodot. Reaaliajan koodekien algoritmien on toimittava hyvin nopeasti, jonka vuoksi ne eivät voi pakata tiedostoja yhtä pieniksi kuin psykoakustiset pakkausmuodot saavuttaakseen saman äänenlaadun. Näiden lisäksi on olemassa täysin häviöttömiä tiedostomuotoja, kuten FLAC ja ALAC. FLAC-koodekki pakkaa tiedoston 50–60 % pienemmäksi kuin alkuperäinen tiedosto ja purkaa tiedoston alkuperäisen identtiseksi kopioksi. Häviötön ALAC -koodekki toimii vain Applen laitteilla. FLAC-tiedoston viisinkertaisesta tiedostokoosta huolimatta yleisesti sanotaan ettei 320 kbps kokoista MP3-tiedostoa erota FLAC-tiedostosta. (Triggs 2020, Katz 2021a)

Bluetooth SIG julkaisi vuonna 2020 LE Audion, joka sisältää LC3-koodekin. Bluetooth 5.2 -versio on ensimmäinen LC3-koodekkia tukeva Bluetooth-versio. LC3 on tehokas Bluetooth-koodekki, joka koodaa puhetta ja musiikkia 8, 16, 24, 32, 44,1 ja 48 kHz näytetaajuuksilla ja 16, 24 ja 32 bitin bittisyvyyksillä. LC3-koodekin bittinopeuden joustavuus luo kehittäjille mahdollisuuden valita painotuksen äänenlaadun ja akunkeston kesken. Kuuntelutestit ovat osoittaneet LC3-koodekin kuulostavan hyvältä matalammillakin bittisyvyyksillä, matalammat bittisyvyydet kuluttavat vähemmän virtaa. LC3-koodekin tehokkuus siis tarkoittaa sitä, että se pystyy siirtämään pienemmillä tiedostoilla laadukkaampaa ääntä kuin esimerkiksi SBC-koodekki. Pienempien tiedostojen siirtäminen kuluttaa vähemmän virtaa eli LC3-koodekki on energiatehokkaampi kuin SBC-koodekki. LC3-koodekki on vielä sen verran uusi, ettei siitä ole toistaiseksi tarkempia tietoja ja sitä käytettäviä laitteita odotetaan tulevan saatavilla mahdollisesti loppuvuodesta 2021 tai 2022 vuoden alussa. (Bluetooth SIG 2021b; Holstad 2020; Katz 2021b)



Kuva 7. Matalan ja korkean näytetaajuuden kuvaaja. (Headphonesty 2019a)

Koodekkien ja äänitiedostojen kohdalla ilmoitetaan usein näytetaajuus, bittinopeus ja bittisyvyys. Näytetaajuus kuvaa miten monta näytettä otetaan sekunnin aikana. Cd-levyn näytetaajuus on 44,1 kHz eli 44100 näytettä sekunnissa. Kuvassa 7 on nähtävissä miten matala ja korkea näytetaajuus eroavat toisistaan. Yleisesti äänityksissä käytetyt näytetaajuudet ovat 44,1 kHz, 48 kHz ja 96 kHz. Joissain äänityksissä käytetään jopa 192 kHz:n näytetaajuutta. Näytteenotossa korkein säilyvä taajuus on nimeltään Nyquistin taajuus, joka on puolet näytetaajuudesta. Näytetaajuuden on oltava vähintään kaksi kertaa niin suuri kuin alkuperäisen analogisignaalin korkein taajuus, jotta koko soiva taajuusalue tulee mallinnettua. Ihmisen teoreettinen kuuloalue on 20 Hz – 20 kHz, joten näytteenottotaajuuden olisi hyvä olla vähintään 40 kHz, jotta ääni ei vääristy liikaa. (Harju 2021b)

Näytteenotossa mitataan audiosignaalin voimakkuutta. Jokaisen näytteen voimakkuusarvo pyöristetään mittauksessa käytettävän asteikon arvoiksi. Mitä enemmän arvoja on käytettävissä, sitä lähemmäs alkuperäistä voimakkuusarvoa päästään. Mittaustarkkuuden sanelee käytettävissä oleva bittisyvyys. Tähän vaikuttaa laitteiston nopeus ja tallennuskapasiteetti. Digitaalinen signaali muistuttaa sitä enemmän alkuperäistä analogisignaalia, mitä tiheämmin näytteitä otetaan ja mitä tarkempi mittaustasteikko eli bittisyvyys on käytössä. Esimerkiksi 4 bitillä saadaan 16 eri arvoa, 16 bitillä saadaan 65 536 eri arvoa ja 24 bitillä eri arvoja on jo yli 16 miljoonaa. (Harju

2021b) Yleisin bittisyvyys on 16 ja äänen kohdalla tämä kuvaa 96,33 dB:n dynaamista laajuutta. Yksi bitti pystyy kuvaamaan noin 6 dB:n dynamiikkatietoa, josta saadaan kunkin bittisyvyyden kokonaisdynamiikka. (Thomas 2021; Harju 2021b)

Mitä isompi bittimäärä, sitä parempi signaali-kohinasuhde, eli hiljaiset äänet eivät huku taustakohinaan. Koska kohina alkaa kuulua dynamiikka-alueen alapäästä, on mielekästä pyrkiä pitämään signaali mahdollisimman voimakkaana. Liian voimakas signaali säröytyy, joten signaalin huiput pyritään jättämään turvallisen matkan päähän maksimitasosta. Jos huippuun jätetään väliä esimerkiksi 20 dB, niin 16 bitin bittisyvyydellä dynamiikka-alue kaventuu 96 dB:stä 76 dB:iin. Ihmisen teoreettinen dynamiikkataaju on noin 90 dB, joten kohina on kuultavissa. 24 bitin bittisyvyydellä vastaavassa tilanteessa kohina jää kuulumattomiin. (Harju 2021b)

Kuultavaan äänenlaatuun vaikuttaa moni muuttuja. Analogisen kuulokeliitännän kautta kuunnellulla äänellä ei ole Bluetooth-yhteyden tapaan kattoa tiedonsiirtonopeuden suhteen, joten se voi olla tarvittaessa niin korkealaatuista kuin halutaan. Häviöttömät Bluetooth-koodekit pystyvät välittämään yli Cd-laatuista ääntä, kun niin äänilähteessä kuin kuulokkeissa on tuki samalle häviöttömälle koodekille. On tärkeää huomioida, että Bluetooth-koodekin lisäksi kuultavaan ääneen vaikuttaa muun muassa kuunneltavan äänitiedoston laatu, kuulokkeiden laatu, taajuushäiriöt ja moni muu tekijä. (Headphonesty 2019a; Fisher 2020b)

### 6.3 Äänilähteet

Taulukossa 3 on yleisimpien äänilähteiden äänenlaatuja kuvaavia äänitietoja ja palveluiden käyttämiä koodekkeja. Cd- ja DVD-levy ovat fyysisiä levyjä, joille voi tallentaa haluamansa laatuista äänitiedostoa. Cd-levyllä olevat äänitiedostot voivat olla bittinopeudeltaan maksimissaan 1411 kbit/s ja tätä korkealaatuisempia äänitiedostoja kutsutaan Hifi-laatuiseksi. DVD-levy on Cd-levyä tilavampi ja kehittyneempi, jonka vuoksi DVD-levylle voi tallentaa jopa Hifi-laatuista äänitiedostoa. Taulukosta 3 nähdään, että yleisimmin käytössä olevien äänipalveluiden bittinopeudet ovat huomattavasti matalampia kuin esimerkiksi Cd-levyn bittinopeus.

Äänilähde	Max bittinopeus	Max näytetaajuus	Max bittisyvyys	Koodekki
<b>Cd-levy</b>	1411 kbit/s	44.1 kHz	16 bittiä	
<b>DVD-levy</b>	9216kbit/s	192 kHz	24 bittiä	
<b>Hi-Res Audio</b>	9126 kbit/s	96 kHz	24 bittiä	
<b>Spotify Premium</b>	320 kbit/s			AAC, Ogg Vorbis
<b>Tidal HiFi</b>	4608 kbit/s	96 kHz	24 bittiä	AAC, ALAC, FLAC
<b>Deezer HiFi</b>	1411 kbit/s	44.1 kHz	16 bittiä	
<b>Amazon Music HD</b>	9126 kbit/s	192 kHz	24 bittiä	FLAC
<b>Deezer Premium</b>	320 kbit/s			MP3
<b>Apple Music</b>	256 kbit/s			AAC
<b>Youtube</b>	256 kbit/s			AAC

Taulukko 3. Äänilähteiden äänitietoja. (Triggs 2020, Molina 2021)

Palveluiden äänitiedostojen pienempi koko saavutetaan pakkaamalla äänitiedostot koodekkia käyttäen tavoitellen mahdollisimman hyvää laatua mahdollisimman matalalla bittinopeudella. Erilaisia äänipalveluita käytetään useimmiten Internet-yhteyttä hyödyntäen, joten tehokkaasti pakatut äänitiedostot eivät aseta Internet-yhteyden tiedonsiirtonopeudelle suuria vaatimuksia. Langatonta kuuntelua ajatellen Bluetooth-yhteyden tiedonsiirtonopeus on rajallinen, joten Bluetooth-kuulokkeilla kuunnellessa tehokkaasti pakatut äänitiedostot varmistavat ongelmattoman tiedonsiirron äänilähteestä kuulokkeisiin. Kaikista suurimman bittinopeuden omaavia äänitiedostoja pystyy siis kuuntelemaan vain langallisesti, jonka vuoksi langallinen 3.5 mm kuulokeliitäntä on audiofiilien keskuudessa suosiossa. Äänipalveluiden äänitiedostojen bittinopeuksien valintojen taustalla lienee ihmiskorvan kuulo ja normaalien äänentoistolaitteiden laatu. Sillä normaali ihmiskorva ei pysty kuulemaan eroa yli 192kbit/s bittinopeudelle koodatun musiikin ja alkuperäisen analogisen äänen välillä, kun musiikki on koodattu käyttäen Ogg-, MP3-, AAC- tai FLAC-äänitiedostoa. (Headphonesty 2019a)

Cd- ja DVD-levyä sekä erilaisia äänipalveluita kutsutaan taulukossa 3 äänilähteiksi, mutta ne ovat itse asiassa erilaisia tapoja nauttia äänitiedostoja. Äänilähteinä toimivat usein mobiililaitteet, kannettavat tietokoneet, MP3-soittimet ja muut kannettavat äänentoistolaitteet. Äänilähteenä käytetty laite ja sen ominaisuudet määrittävät sen

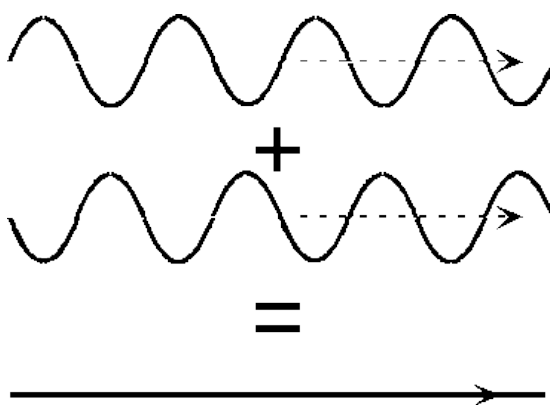
miten korkealaatuista ääntä ne pystyvät siirtämään ja toisaalta kuulokkeet sekä niiden liitännästeknologia vaikuttavat siihen miten hyvälaatuista ääntä kuulokkeilla on mahdollista toistaa. Hifi-äänitiedostojen korkeasta äänenlaadusta saa hyödyn, mikäli käytössä on Hifi-tasoinen äänentoistolaitteisto. Normaalikuuntelija ei hyödy keskitason kuulokkeillaan yli 192kbit/s bittinopeuden äänen striimaamisesta. (Headphonesty 2019a)

Äänilähteiden saralla tapahtuu koko ajan kehitystä ja uusimpien käyttöjärjestelmäpäivitysten myötä käyttöjärjestelmät tukevat uusia koodekkeja. Applen laitteita ja kuulokkeita käyttäviä ajatellen Apple tiedotti lisäävänsä kesäkuussa 2021 uuden häviöllisen koodekin ja häviöttömän ALAC-koodekin Apple Music-palveluun. Häviötöntä Hifi-laatuista ALAC-koodekkia tukee Applen mobiililaitteet, tietokoneet ja Apple TV, mutta mikään Applen kuulokkeista, kuten AirPods tai AirPods Max, ei tule tukemaan ALAC-koodekkia. Applen kuulokkeet tukevat vain Bluetooth AAC-koodekkia, joten ne eivät pysty toistamaan ALAC-tiedostoja. (Prasad 2021) Googlen odotetaan lisäävänsä Android 12 -käyttöjärjestelmäpäivityksessä tuen Bluetooth LE Audio:lle, jonka myötä myös LC3-koodekki on käytettävissä, mikäli käytössä olevat laitteet tukevat sitä. (Siddiqui 2021) Windows 10-käyttöjärjestelmään on tulossa uuden käyttöjärjestelmäpäivityksen myötä tuki AAC-koodekille Bluetooth-yhteyden välityksellä. Windows -käyttöjärjestelmä on aiemmin tukenut Bluetooth-yhteyksille vain SBC- ja AptX-koodekkia. AAC-koodekin tuen myötä Windows-käyttöjärjestelmän käyttäjät voivat nauttia laadukkaammasta äänestä Applen-kuulokkeilla iTunes- tai Apple Music-palveluista ääntä kuunnellessaan. (Warren 2021)

## 7 VASTAMELUTEKNIikka

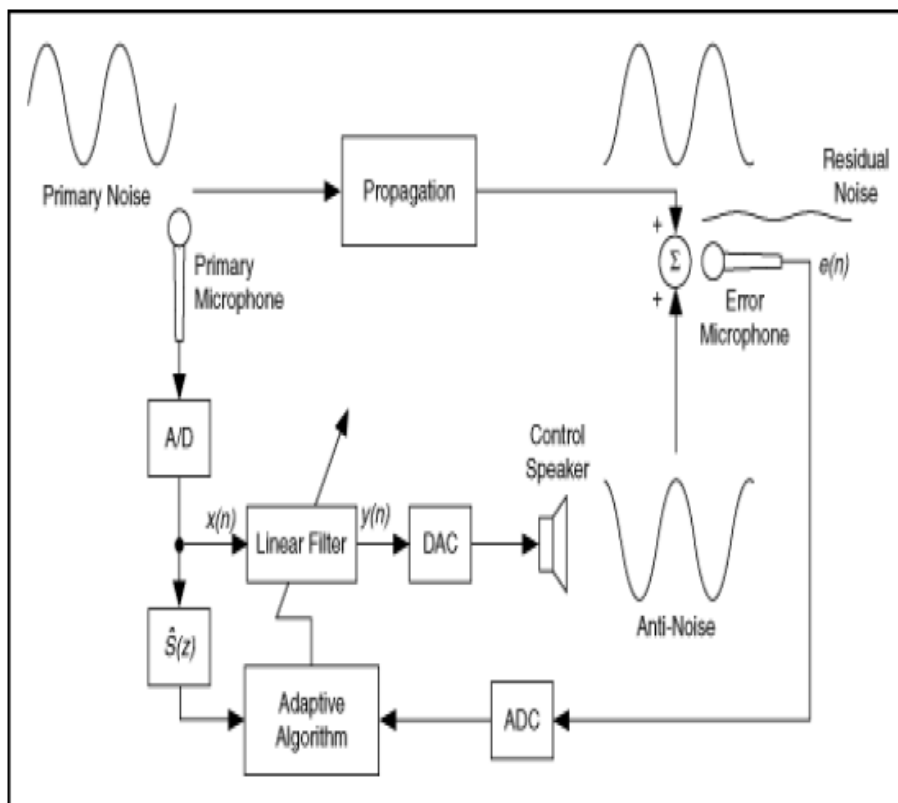
Kuulokkeiden läpi tulevaa melua on mahdollista hallita passiivisesti ja aktiivisesti. Passiivista melunhallintaa on mahdollista toteuttaa esimerkiksi ääntä eristävillä koteloilla, kuten korvien ympärille tulevilla kuppikuulokkeilla. Siitä huolimatta, että passiivisella melunhallinnalla on mahdollista saavuttaa hyvä melunvaimennus laajalla taajuusalueella, niin se on kookas ja kallis toteuttaa matalille taajuuksille pitkien akustisten aaltopituuksien vuoksi. Aktiiviset melunhallintakeinot ovat tehokkaita matalien taajuuksien melunvaimennuksessa hyödyntäen toissijaisia lähteitä alkuperäisen ensisijaisen lähteen melun vähentämiseksi päällekkäisyyden perusteella. (Siswanto et al 2020)

Aktiivisen melunhallinnan periaatteena on, että kuulokkeet tuottavat vastaäänen kuulokkeiden läpitulevalle äänelle ja vastaääni toistetaan takaisin vastakkaiseen suuntaan. Tämän seurauksena kuulokkeet läpäisevä ääni ja vastaääni kumoavat toisensa korvan sisäänkäynnin kohdalla. (Guldenschuh et al 2021) Tapahtumassa hyödynnetään kuvassa 8 näkyvää destruktiivista interferenssiä epätoivotun äänen supistamiseksi, joka yleensä tapahtuu mikrofoniin ja DSP-tekniikan avulla. Vastamelutekniikka ei käytä seisovaa aaltoa hyödyksi, vaikka molemmissa tapauksissa voidaan havaita destruktiivinen interferenssi. Seisova aalto syntyy kahden kohtisuoran kovan pinnan välille, kun vastamelutekniikka hyödyntää destruktiivista interferenssiä, joka tapahtuu ilmassa ennen tilan vaikutusta. (Metsäranta 2020)



Kuva 8. Destruktiivinen interferenssi. (Connecticut University 2021)

Tyypillisesti ANC-systeemit ovat tehokkaita matalataajuisen melun vähentämiseen, joten vaadittu näytteenottotaajuus on matala. Kuvassa 9 on perinteisen ANC-systeemin designkuvaaja. Lähdemikrofonien lukumäärän kasvattaminen voi auttaa parantamaan melunvaimennusta, kun on useampia melunlähteitä. (Das et al 2006) Audio -systeemit tarvitsevat korkeamman näytteenottotaajuuden, yleensä 8 kHz puhesignaalille ja 44.1 kHz musiikkisignaalille. Mikäli matalaa näytteenottotaajuutta käytetään ANC- ja Audio -systeemille, korkeataajuiset äänikomponentit katoavat. Mikäli käytetään korkeaa näytteenottotaajuutta, niin ANC-systeemi tarvitsee pidemmät suodattimen pituudet ja altistuu korkeamman taajuisille meluille laskien suorituskykyä. (Siswanto et al 2020)



Kuva 9. Perinteinen ANC-systeemin design. (Bonde. et al 2020)

Vastamelukuulokkeet perustuvat integroituun Audio ANC-algoritmiin, koska on välttämätöntä välttää vääristämästä kohdesignaalia. (Gan et al 2002) Vastamelutoiminnon toimivuuteen vaikuttaa kuulokkeiden istuvuus, mitä parempi kuulokkeiden istuvuus sitä paremmin vastamelutoiminto toimii. Äänen vuotaessa

huonon istuvuuden vuoksi, kuulokkeet eivät tuota riittävästi matalien taajuuksien äänenpainoa kumoamaan läpitulevaa ääntä, jonka vuoksi vastaanäni tulee kasvaneen ryhmäviiveen vuoksi myöhässä. (Guldenschuh 2012)

Vastamelukuulokkeiden ANC-algoritmit käyttävät adaptiivisia filttäreitä tuottamaan vastaanäniäsignaaleja, jotka soitetaan takaisin kuulokkeista vähentämään primäärisen melun pääsemistä korvakanavaan. ANC jaetaan yleisesti kahteen luokkaan feedforward- ja feedback- ANC:hen mikrofoniin sijoittelun mukaan, joten on olemassa kahdenlaisia ANC-algoritmeja eli feedback- ja feedforward-algoritmeja. (Siswanto et al 2020) Feedforward-tapa tarkoittaa sitä, että mikrofoni sijoitetaan melun lähteen puolelle ja feedbacktapa taas sitä, että mikrofoni sijoitetaan sisäpuolelle tilaan, josta melu halutaan torjua. Näiden yhdistelmää kutsutaan hybrid -ANC:ksi, joka käyttää molempia tapoja melun torjumiseen. (Metsäranta 2020) FxLMS-algoritmi on yksi tehokkaimmista ja käytännöllisimmistä adaptiivisista feedforward ANC-algoritmeista. Nykyaikaisissa ANC-kuulokkeissa käytetään kahdenvälistä aktiivista melunhallintaa hyödyntäen FxLMS-algoritmia kummassakin kuulokkeessa erikseen. (Belyi 2020)

Feedforward-tavan ANC:n rakenne on sellainen, että tarvitaan lähdesensori tuottamaan melutieto lähdearvokontrollerille, jotta voidaan luoda korjaava vastameluääni toissijaisen lähteen soitettavaksi. Virhesensori vastaanottaa jäännösmelun virhesignaalin kontrollerin päivittämiseksi. (Siswanto et al 2020) Suurimmassa osassa feedforward ANC-algoritmia käyttävissä vastamelukuulokkeissa käytetään Belyi et al (2020) mukaan vain yhtä lähdemikrofonia, joka on toisessa kuulokkeessa ja kuulokkeen sisäpuolella olevaa virhemikrofonia. Kummallakin kanavalla käytetään samaa melunhallintasisignaalia, jonka heikkoudeksi Belyi et al (2020) mainitsee useammista eri suunnista tulevat melunlähteet. Osassa feedforward ANC-algoritmia käyttävissä kuulokkeissa ANC on toteutettu kahdenvälisellä ratkaisulla, jossa molemmilla kanavilla on omat lähde- ja virhemikrofonit, ja ANC-algoritmia hyödynnetään itsenäisesti kummallakin kanavalla. Kanavien välillä ei ole vuorovaikutusta eikä tiedonvaihtoa ja kummankin kanavan melunvaimennusten suoritustasot voivat olla erit. (Belyi et al 2020) Käytännönkohteissa, joissa melulähde on tuntematon, lähdemelua ei voida selvittää. Kun lähdesensoria ei tarvita, niin voidaan käyttää feedback hallintarakennetta. (Siswanto et al 2020)



Analoginen feedback-ANC perustuu negatiiviseen feedback-hallintajärjestelmään, johon vaikuttaa muun muassa viive. Viiveen minimoimiseksi virhesensori on sijoitettava lähelle toissijaista lähdettä. Tällainen toteutus on toimiva ratkaisu ANC-kuulokkeille. Toinen ratkaisu on käyttää digitaalista feedback-ANC:tä, joka perustuu sisäiseen mallihallintaan, jossa kontrolleri toimii ennakoivana. Digitaalinen feedback ANC-systeemi voi vähentää vain ennakoitavaa melua ja adaptiivisesti toimiessaan digitaalinen feedback ANC-systeemi voi olla tarkka. Tällaista systeemiä kutsutaan adaptiiviseksi feedback ANC-systeemiksi ja se sopii paremmin kapeakaistaisen kuin laajakaistaisen melun vähentämiseen. Kapeakaistaista melua on yleensä elinympäristössä, kuten pyörivistä koneista lähtevää melua. (Siswanto et al 2020)

## 7.1 Vastamelutoiminnon historiaa

Vuonna 1978 tohtori Amar Bose kokeili lennolla Bosen uusia kuulokkeita, mutta huomasi harmikseen, että lentokoneen matkustamomelu oli niin voimakasta, ettei musiikkia kuullut selvästi. Bose teki lennon aikana hahmotelmat ensimmäisille vastamelukuulokkeille. Bose suunnitteli systeemin, jossa kuulokkeiden sisällä on mikrofoni, joka vastaanottaa ympäröivän melun. Tälle melulle kehitettiin sähköisesti vastaava vastakkainen signaali, joka poisti äänen ennen kuin ääni saavutti kuuntelijan tärykalvon. Vuosien tutkimustyön tuloksena Bosen insinööriimi sai tehtyä toimivan vastamelukuulokkeen prototyypin, jota käytettiin Voyagerin maailmanympäri lennolla. Vuonna 1989 Bose julkaisi ensimmäiset kaupallisesti saatavilla olevat Bose Aviation Headset -vastamelukuulokkeet, joilla oli mahdollista kuulla ääni ja keskustelut selkeämmin ja pienemmällä äänenvoimakkuudella. (Beacham 2015)

Bose kehitti vastamelukuulokkeista taisteluversion armeijalle, sillä hekin halusivat vastamelukuulokkeet käyttöönsä. Bose Combat Vehicle Crewman Headset -kuulokkeita alettiin valmistamaan vuonna 1993 Yhdysvaltojen armeijalle. Vuonna 2004 Bose julkaisi TriPort tactical headset -kuulokkeet, jonka jälkeen Bosen melunvähennysteknologiaa alettiin hyödyntämään kuulokkeisiin yleisesti. Digitaalisen teknologian kehittyminen on auttanut osaltaan kehittämään vastamelutoimintoa entistä

paremmaksi, mutta myös kuulokkeiden äänenlaatu ja kuulokkeiden mukavuus on parantunut. (Beacham 2015)

Vastamelutoiminto toteutettiin vuonna 2000 julkaistuissa ensimmäisissä kuluttajille suunnatuissa Bosen QuietComfort 1 vastamelukuulokkeissa pattereilla toimivalla kuulokejohdon yhteydessä olevalla yksiköllä. (Guitar Center 2021) Seuraavassa Bose QuietComfort 2-versiossa vastamelutoiminto toteutettiin oikeanpuoleiseen kuulokkeeseen integroimalla, vastamelutoiminto sai virtansa kuulokkeeseen laitettavasta paristosta. Bose QuietComfort 2 kuulokkeiden vastamelutoimintoa pystyi käyttämään liittämättä kuulokkeita äänilähteeseen. (Beacham 2015)

## 7.2 Vastamelutoiminnon tulevaisuuden näkymät

Binauraalisen ANC:n ideana on jakaa lähdesignaalit vasemman ja oikean kanavan kesken ja hyödyntää lähdesignaaleja molempien kanavien prosessointiin. Toisen kanavan signaali voi sisältää hyödyllistä informaatiota toisen kanavan melunvähennykselle. Binauraalinen ANC -algoritmi parantaa molempien kanavien meluvähennyksen suorituskykyä, kun on eri suunnista olevia useampia melunlähteitä ja kun on diffuusua kenttämellua. Kanavien välinen vuorovaikutus voi auttaa kohdistamaan molempien kanavien melunvaimennusten tasoa ja ehkäisee käyttäjää tuntemasta melunvaimennusten epätasapainoa. (Belyi et al 2020)

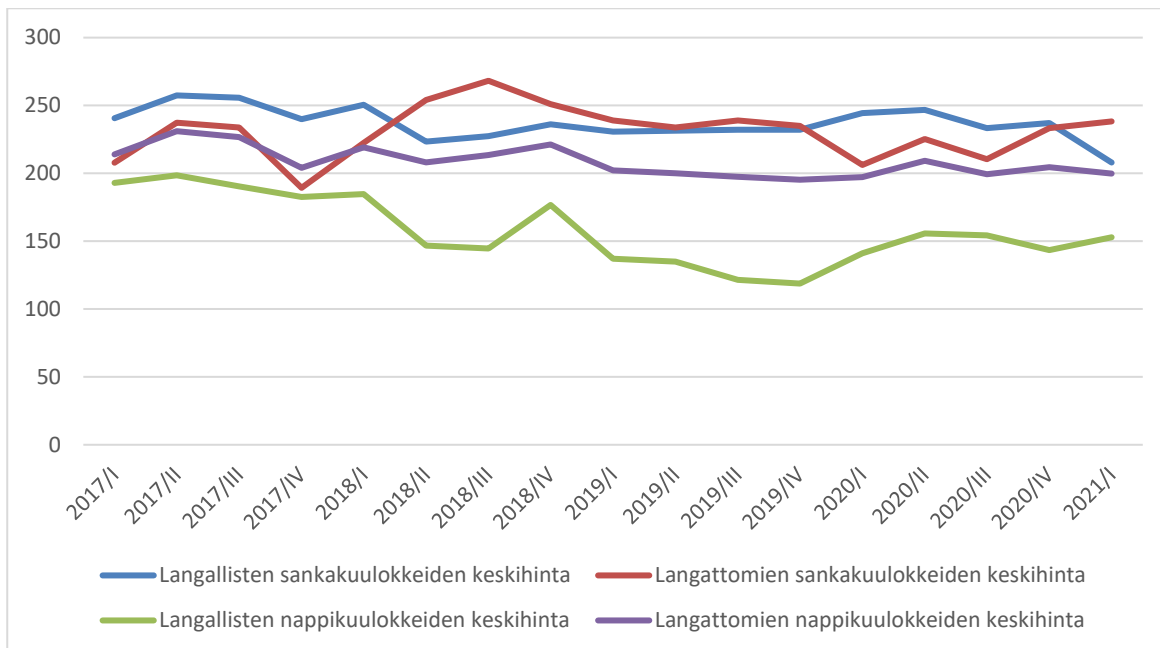
Belyi et al (2020) ehdottaa tutkimuksessaan uutta CBBANC-algoritmia, joka valitsee ja vaihtaa automaattisesti binauraalisen ja bilateraalisen ANC:n suoran ja poikkikanavan koherenssimittauksen mukaan, näihin mittauksiin vaikuttaa merkittävästi ympäristömeluskenaariot. CBBANC-algoritmi näytti Belyi et al (2020) tutkimuksessa pystyvän valitsemaan parhaan mahdollisen binauraalisen tai bilateraalisen toteutuksen käsitelläkseen erilaiset meluympäristöt ja toistamaan parhaan ANC:n toteutuksen meluvähennyksen.

## 8 HINTAKEHITYS 2017-2021

Kandintyössä kuulokkeiden hintakehitystä tarkasteltiin vuosien 2015 ja 2020 välisellä ajanjaksolla Hintaopas -sivuston hintahistorioita hyödyntäen liitteessä 1 näkyvällä tavalla. Työssä tuotiin esille, että vuosien välein tehty hintatarkastelu ei ollut luotettava tarkempia yhteenvetoja ajatellen. Kuulokkeiden hintakehitystä on siis syytä tarkastella tiheämmin kuin kerran vuodessa. Tässä työssä tutkitaan kuulokkeiden hintatietoja Hintaopas -sivuston hintahistoriasta kolmen kuukauden välein ja selvitetään, onko hintakehityksestä mahdollista päätellä muutoksia.

Hintaopas -sivuston hintahistoriasta näkyvä ajanjakso on muuttunut kandityössä tapahtuneesta tarkastelusta, jolloin hinnat näkyivät vuodesta 2015 lähtien, sillä nyt sivustolta näkee hinnat vuodesta 2017 alkaen. Hintakehityksen tarkastelu suoritetaan kolmen kuukauden välein samalla päivällä ja mikäli hintatietoa kyseiseltä päivältä ei ole tarjolla, niin päivästä seuraavaa tai sitä lähimpänä olevaa ajankohtaa. Aiempaan hintakehityksen vertailuun poiketen hintoja ei kerätty puutteellisten hintatietojen vuoksi seuraavilta kuulokkeilta Philips Fidelio M1MKII, Sony MDR-1000X ja Earfun Air. Langattomia nappikuulokkeiden kohdalla Earfun Air -kuulokkeet korvattiin Apple AirPods -kuulokkeilla, jotta kussakin kuulokeryhmässä oli viisi vertailtavaa kuuloketta. Hintakehityksen tarkastelussa kerätyt hintatiedot löytyvät liitteestä 2. (Hintaopas 2021)

Kuvassa 10 näkyy kuulokkeiden keskihintojen kuvaajat. Kuvaajassa näkyy vuosien yhteydessä I – IV luvut, jotka kuvaavat hintojen tarkasteluajankohtia eri vuodenaikoina. I kuvaa maaliskuun 24. päivää, II kuvaa kesäkuun 24. päivää, III kuvaa syyskuun 24. päivää ja IV kuvaa joulukuun 24.päivää. Päivämäärät on korvattu kreikkalaisilla numeroilla kuvaajan selkeyttämisen vuoksi.



Kuva 10. Kuulokkeiden hintakehitys vuosina 2017–2021.

Vertailtaessa kuvassa 10 nähtäviä kuulokkeiden keskihintojen kuvaajia liitteessä 1 nähtäviin kuvaajiin huomataan, että kuvassa 10 näkyy merkittävästi enemmän vaihtelua. On hyvä huomata, että liitteessä 1 nähtävässä kuvaajassa ja kuvassa 10 vertailun aloitus- ja lopetusajankohdat ovat erit. Yhtäläisyytenä näissä kahdessa kuulokkeiden hintakehityksen kuvassa on kuvaajien suunnat, kun tarkastellaan kuvaajien alku- ja loppupisteitä. Vertailtaessa keskihintojen käyriä taulukossa 4 näkyviin kandidaatintyössä tehdyn hintatutkimuksen hintatietoihin huomataan hintakehityksessä tutkittujen kuulokkeiden olevan huomattavasti kalliimpia kuin hintatutkimuksessa tutkitut kuulokkeet.

<b>Kuuloketyyppi</b>	<b>Keskinta</b>	<b>Mediaanihinta</b>
<i>Langalliset sankakuulokkeet</i>	71,70 €	38 €
<i>Langalliset nappikuulokkeet</i>	66,10 €	30 €
<i>Langattomat sankakuulokkeet</i>	157,50 €	129,50 €
<i>Langattomat nappikuulokkeet</i>	90,00 €	79 €
<i>TWS-kuulokkeet</i>	139,10 €	129 €

Taulukko 4. Hintatutkimuksen hintatietoja (Lundbom 2021)

Hintakehitystutkimuksen keskihintojen kuvaajista voidaan nähdä kaikkien muiden kuuloketyyppien kuin langattomien sankakuulokkeiden pudottaneen keskihintojaan

tarkastellun ajanjakson aikana. Langattomien sankakuulokkeiden kohdalla on hyvä huomioda, että kaikkien viiden vertailussa olleen kuulokkeen hintatietoja oli saatavilla vasta 2018/III alkaen, joten tarkastelu voisi olla järkevintä tehdä siitä alkaen. Mikäli langattomien sankakuulokkeiden keskihinnan kehitystä tarkastellaan 2018/III alkaen huomataan myös niiden keskihinnan tippuneen tarkastellun ajanjakson aikana.

Kandidaatintyössä (Lundbom 2021) ehdotettu tiheämpi kuulokkeiden hintatietojen tarkastelu hintakehityksen selvittämiseksi näyttäisi antavan lisätietoa kuulokkeiden keskihintojen muutoksista. Hintaopas -sivuston hintahistorian muutoksen vuoksi hintakehitystä tarkasteltiin 2015 vuoden sijaan 2017 alkaen, 2017–2021 välinen ajanjakso on riittävän pitkä tarkasteluväli. Kullekin kuuloketyypille olisi hyvä tehdä ominaisuusrajaus ja esimerkiksi erottaa Hifi- ja TWS-kuulokkeet erilleen omiksi kuulokeryhmiksi, jotta kuulokkeiden hintakehityksen tarkastelun tuloksista voitaisiin tehdä mahdollisimman hyviä johtopäätöksiä.

## 9 AKKUTEKNOLOGIA

Bluetooth-teknologian kehittymisen myötä langattomat kuulokkeet ovat yleistyneet. Langattomat kuulokkeet saavat virtansa laiteen sisällä olevasta akusta, joten akkuteknologiasta on tullut merkittävä tekijä kuulokkeiden kohdalla. Ensimmäisten langattomien kuulokkeiden akkujen virta kesti vain muutaman tunnin, mutta nykyään langattomien kuulokkeiden akunkesto voi olla jopa yli 60 tuntia. Laadukkaiden kuulokkeiden akunkesto on yleensä noin 20–30 tuntia yhdellä latauksella kaikki lisäominaisuudet päällä. (Susic 2020b) Taulukosta yksi on nähtävissä, että kandidaatintyössä Lundbom (2021) suoritetussa hintatutkimuksessa kerättyjen tietojen perusteella laskettu langattomien sankakuulokkeiden akunkeston keskiarvo oli samaa luokkaa.

Akkujen kehityksessä ei ole tapahtunut mullistavaa kehitystä vuosikymmeniin. Käytetyin ladattava akkutyyppejä on Litium-ioni-akku, jonka koko määräytyy käytössä olevan kuulokemallin mukaan. Litium-ioni-akku säilyttää täyden kapasiteetin tyypillisesti noin 300–500 latauskerran ajan, kunnes akun kapasiteetti laskee alle 80 prosentin. Litium-ioni-akkujen elinikään vaikuttaa latauskertojen lisäksi myös akun altistaminen korkeille lämpötiloille. (Battery University Group 2017) Mitä pidempi akunkesto on, niin sitä pidempi akun elinikä on odotettavissa, sillä silloin akkua joudutaan lataamaan harvemmin. Sankakuulokkeissa on fyysisen kokonsa ansiosta melko isot akut, jonka vuoksi sankakuulokkeiden akunkesto voi olla yli 40 tuntia. Viime vuosina suureen suosioon nousseissa TWS-kuulokkeissa on pienen kokonsa vuoksi varsin pienet akut ja maltilliset akunkesto. TWS-kuulokkeiden säilytyspaikkana toimivissa latauskoteloissa voi olla jopa usean latauskerran verran virtaa. TWS-kuulokkeiden akkujen elinikä voi olla pienten akun kapasiteettien ja tiheimmän lataustiheyden vuoksi jopa vain noin 2 vuotta. Käyttötavat ja -olosuhteet vaikuttavat merkittävästi kuulokkeiden akkujen elinikään, joten akkujen eliniät vaihtelevat käyttötapojen mukaan. (Dragan 2021)

Akkujen latausteknologioita sivuttiin kandidaatintyössäni (Lundbom 2021) liitäntäteknologioiden ja kuulokkeiden lisäominaisuuksien yhteydessä.

Kandidaatintyössä (Lundbom 2021) käsitelin Lightning- ja USB-C-teknologioita, jotka ovat teknisiltä toteutuksiltaan hyvin samankaltaisia. Lightning-liitäntä on Applen liitäntäteknologia, joten sitä käytetään vain Appllelle suunnatuissa laitteissa. USB-C-teknologia yleisesti käytössä oleva mobiili- ja lisälaitteiden latausteknologian standardi. Lightning- ja USB-C-liitäntöjen lisäksi kuulokkeita on mahdollista ladata myös langattomasti, kun kuulokkeissa on tuki langattomalle lataukselle. (Lundbom 2021)

## 9.1 Langaton lataus

Latausteknologiat ovat kehittyneet, jonka ansiosta fyysisten latauskaapeleiden sijaan laitteita voi ladata myös langattomasti. USB- tai Lightning-liitäntään sijaan sähkö siirretään langattomasti kelalta toiselle. Yksi kela on langattoman latausalustan sisällä ja toinen ladattavan laitteen, kuten mobiililaitteen tai TWS-kuulokkeiden latauskotelon, sisällä. Jawad et al (2018) rakensi tutkimuksessaan langattoman laturin, joka latoi minkä vain akkukäyttöisen laitteen, kun laite oli asetettu latausalustalle tai laitteelle suunniteltuun latausasemaan. Yleensä ladattavalla laitteella on oltava tuki langattomalle lataukselle, jotta langaton lataaminen on mahdollista. Wireless Power Consortium julkaisi ensimmäisen teollisuusstandardin mobiililaitteiden induktiiviselle lataamiselle, jota kutsutaan Qi:ksi. (Luo et al 2020) Qi on yleisin langattoman lataamisen protokolla. (Susic 2020a) Langaton lataus voi lisätä latauksen luotettavuutta, sillä latausliitin voi vaurioitua latauskaapelin adapterin vääränlaisesta käytöstä. Laitetta voi myös ladata, vaikka laitteen kotelo olisi kokonaan suljettu tai jopa vesitiivis. Langattoman lataus on hyödyllinen ominaisuus langattomille kuulokkeille, sillä langattoman latauksen ansiosta kuulokkeet voidaan valmistaa esimerkiksi hienkestäviksi urheilukäyttöön. (Jawad et al 2018)

Langattoman lataaminen perustuu Faradayn induktiolakiin, jota käytetään yleisesti moottoreissa ja muuntajissa. Latausprosessissa käyttäjä asettaa latausalustan suoraan kontaktiin ladattavan laitteen kanssa, mahdollistaen näin langattoman lataamisen. Merkittävä virtamäärän siirtäminen langattomasti tapahtuu yleensä hyödyntämällä magneettikenttiä, jotka ovat erittäin suoria ja menettävät tehonsa etäisyyden kasvaessa. Tästä syystä kehittyneimpienkin langattomien latureiden latausetäisyys on rajoitettu

muutamaan senttimetriin ja vaatii ladattavan puhelimen olevan täydellisessä asennossa latausalustalla. (Jawad et al 2018)

Luo et al (2020) rakensi tutkimuksessaan induktiivisen langattoman latausaseman, jolla pystyi lataamaan langattomia kuulokkeita, matkapuhelinta ja matkakaiutinta. Heidän suorittamassaan tutkimuksessa selvisi, että rakennettu langaton laturi latasi kuulokkeiden 300 mAh:n akun 5 Watin latausteholla täyteen. Yleensä normaalit langattomat laturit toimivat maksimissaan 5–10 Watin teholla, koska langattoman laturin kela tuottaa lämpöä. Langattomassa laturissa on oltava viilennysratkaisu, mikäli langattomasta laturista halutaan tehokkaampi. Parhaimmissa langattomissa latausalustoissa sisäänrakennetut tuulettimet varmistavat, ettei laturi kuumene liikaa. Esimerkiksi OnePlus:n valmistama latausalusta voi ladata jopa 30 Watin teholla, mutta se tarvitsee isot ja äänekkäät tuulettimet haihduttamaan kaiken luodun lämmön. (Susic 2020a)

Huhtikuussa 2021 Urbanista julkaisi uudet Los Angeles-kuulokkeet, jotka ovat ensimmäiset itsensä lataavat vastamelukuulokkeet. Kuulokkeet hyödyntävät ruotsalaisen Exeger-yrityksen kehittämää Powerfoyle™-teknologiaa, jonka avulla kuulokkeet latautuvat aina niiden altistuessa valolle. Powerfoyle™-teknologia perustuu uudenlaiseen aurinkokennoteknologiaan, joka muuttaa kaikenlaista valoa puhtaaksi energiaksi. Kuulokkeiden kerrotaan saavan aurinkoisella säällä tunnissa kolme tuntia soittoaikaa ja pilvisellä säällä tunnin aikana kaksi tuntia soittoaikaa. Kuulokkeiden sanotaan lataantuvan myös hyvin valaistussa sisätilassa ja kuulokkeiden ollessa poissa käytöstä niiden kerrotaan lataantuvan tunnin ikkunan ääressä olon aikana tunnin soittoajan verran. (Cision 2021)

Urbanistan ilmoittamat soittoaika-arviot perustuvat tiettyihin valo-, lataus- ja käyttöoletuksiin ja aluksi täysin ladattuun akkuun. Laskelmissa on arvioitu ulkoilmassa olevan valon vähintään 30 000 luksia ja sisätiloissa vähintään 1000 luksia. (Cision 2021) Kodin oleskelutiloissa valaistusvoimakkuus on useimmiten 100–500 luksia ja Suomen ympäristöministeriön selvityksen mukaan 300 luksin on usein riittävän hyvin päivänvalaistun tilan valaistusvoimakkuus. (Saarelainen 2019; Vikberg et al 2019) Suomen ympäristöministeriön teettämästä selvityksestä ilmenee, että Suomessa suora



aurionvalo on voimakkaimmillaan 70 000 luksia, kun pilvisenä talvipäivänä päivänvalon valaistuvoimakkuus voi olla vain pari tuhatta luksia. (Vikberg et al 2019) Kuulokkeiden Powerfoyle™-teknologialla saavutettavien soittoajankasvulaskelmissa käytetyt valovoimakkuuksien arviot ovat korkeat keskimääräisiin Suomen sisä- ja ulko-olosuhteisiin, joten Suomessa ei saavutettane laskelmien mukaisia soittoajan pidentymisiä. Etelämpänä sijaitsevilla mailla saavutettavat valaistuvoimakkuudet voivat olla lähempänä laskelmissa käytettyjä valovoimakkuuksia.

## 9.2 Kestävä kehitys

Laadukkaille kuulokkeille on usein saatavilla erilaisia varaosia, jolloin kuulokkeiden kuluneita tai hukkuneita osia voi korvata uusilla osilla. Tällaisia vaihdettavia osia ovat esimerkiksi kuulokkeiden pehmusteet, silikonisovitteet, latausjohdot, suojakotelot ja äänikaapelit. (Bose 2021) Työssä aiemmin mainittu irrotettava mikrofoni on myös vaihdettavissa, jos sellainen on hankittu laajentamaan kuulokkeiden mahdollisia käyttötilanteita.

Langattomien kuulokkeiden kohdalla käyttöiän rajoitteeksi muodostuu kuulokkeiden akku, joka kestää rajallisen määrän latauskertoja ja lopulta akunkesto heikkenee merkittävästi. Villas-Boas kirjoittaa, että AirPods Pro -kuulokkeiden akut kuluvat loppuun ajan myötä, kuten mikä tahansa akullinen laite. Villas-Boas mainitsee artikkelissaan, että Applelta on ostettavissa takuuajan ohittaneille kuulokkeille palvelu, jossa kuulokkeiden akut ja haluttaessa latauskotelon akku vaihdetaan. Kunkin akun vaihtaminen maksaa artikkelin mukaan 49 \$ per kappale, joten kaikkien kolmen akun vaihtaminen maksaa 147 \$. Uudet AirPods Pro -kuulokkeet maksavat artikkelin mukaan 250 \$, joten akkujen vaihtaminen tulisi huomattavasti halvemmaksi kuin uusien kuulokkeiden ostaminen. (Villas-Boas 2020)

Draganin (2021) mukaan Podswap -yrityksen toiminta perustuu Apple AirPods -kuulokkeiden kuunostamiseen ja niiden myyntiin. Toistaiseksi yritys kunnostaa vain Applen AirPods -kuulokkeita, mutta kuulokkeiden kunnostamiseen perustuva yritystoiminta on jo itsessään merkki, että kuulokkeiden käyttöikä on mahdollista

jatkaa akkujenvaihdolla. Podswap -yritys ei huolla muita kuin akkuviallisia kuulokkeita, mutta he kierrättävät heille lähetetyt korjauskelvottomat kuulokkeet. (Podswap 2021)

Kuulokevalmistajat voisivat huomioida TWS-kuulokkeiden suunnittelussa ja valmistelussa niiden huoltamisen, jolloin niiden korjaaminen olisi helpompaa. Nykymarkkinoilla olevista TWS-kuulokkeista osaan tarvitsisi vaihtaa vain käytetty liima tai käyttää akkupidikkeitä juottamisen sijaan. Ideaalimaailmassa kuulokevalmistajat voisivat säätää kuulokkeiden designit, järjestää akkujenvaihtopalvelut, luoda auktorisoidut huoltokeskukset ja jopa tarjota huoltopakkauksia, joilla käyttäjät voisivat itse huoltaa kuulokkeet. Kuulokkeiden teknologian vanhentuessa, valmistajat voisivat laskea ekologista jalanjälkeään ja palkita merkkiuskollisuudesta tarjoamalla ilmaisia kierrätyspalveluita ja alennuksia uusista kuulokkeista kierrätettäessä vanhat samanlaiset. (Dragan 2021)

## 10 OMAT KOKEMUKSET KUULOKKEISTA

Omat ensimmäiset kokemukset kuulokkeiden käytöstä juontavat juurensa 1990-luvun alkuun käyttäessäni kuulokkeita korvalappustereoiden kanssa. Ensimmäiset käyttämäni kuulokkeet olivat ulkonäöltään hyvin samanlaiset kuin Sonyn MDR-3-kuulokkeet. Kuulokkeet olivat muotoilultaan ja toiminnoiltaan hyvin yksinkertaiset ja kevytrakenteiset 3.5 mm plugilla olevat kuulokkeet. Kuulokkeiden korvaa vasten tulevat pehmusteet eivät olleet kulutusta kestäviä ja olivat alttiita repeytymisille. Yksinkertaisen rakenteen ansiosta kuulokkeet on ollut helppo valmistaa. Korvalappustereoissa äänimateriaali soitettiin c-kaseteilta ja niiltä soitettu äänenlaatu oli kokemusteni mukaan varsin maltillista tasoa. Korvalappustereoita käyttäessäni olin hyvin nuori, joten kuuntelemani äänimateriaali oli usein lapsille suunnattua materiaalia eikä siten mahdollisesti hyödyntänyt kuulokkeiden koko äänenlaadullista potentiaalia. Ensimmäisten käyttämieni kuulokkeiden jälkeen käytin pääasiallisesti nappikuulokkeita korvalappustereoiden kanssa. Nappikuulokkeet olivat hyvin yksinkertaiset, korvanapeille ei ollut vaihtopäitä ja kuulokkeet toistivat ääntä yllättävän suurella äänenvoimakkuudella. Ensimmäisten kuulokkeideni tärkeimmät kriteerit olivat kompakti koko ja äänen toistaminen, äänenlaadullisesti merkittäväntä oli äänen selkeys ja basson toisto.

Älypuhelimet yleistyivät 2000-luvun loppupuolella ja niistä tuli varteenotettavia kilpailijoita mediasoittimille, kuten MP3-soitin ja muut kannettavat soittimet. Älypuhelimia alettiin markkinoimaan musiikkipuhelimina ja esimerkiksi Nokia markkinoi N97 Mini -älypuhelintaan Ovi-musiikkipalvelun määräaikaaisella ilmaisella käyttölisenssillä. N97 Mini -älypuhelimien myyntipakkauksessa tuli mukana langallisesti 3.5 mm plugilla olevat stereokuulokkeet, jotka olivat kokemuksieni mukaan äänenlaadultaan hyvää luokkaa. Älypuhelimien mukana tulleet nappikuulokkeet olivat siihen asti äänenlaadullisesti parhaimmat kuulokkeet, joita olin käyttänyt. Nappikuulokkeiden mukana tuli useita silikonisovitteita, joista pystyi valitsemaan korviin parhaiten sopivat sovitteet. Nappikuulokkeet tulivat sopivien sovitteiden ansiosta tiiviisti korviin ja vaimensivat erinomaisesti ympäristön ääniä passiivisesti, joten toistettu ääni kuului todella selkeästi. Kyseiset nappikuulokkeet toistivat basson

hyvin voimakkaasti, joka sopi omiin mieltymyksiin. Nappikuulokkeiden johdosta oli tehty sotkeutumaton ja kuulokkeiden johtoon oli liitetty helppokäyttöinen kauko-ohjain, jolla pystyi esimerkiksi lisäämään äänenvoimakkuutta ja vastaamaan puhelimeen. Nappikuulokkeiden suunnittelussa oli siis huomioitu käytettävyys, ergonomia ja äänenlaatu huomattavasti paremmin kuin aiemmissa kuulokkeissani. Kuulokkeiden valmistamisen näkökulmasta nappikuulokkeet ovat olleet haastavammat valmistaa, sillä kuulokkeisiin on täytynyt valmistaa erikseen laadukkaita silikonisovitteita ja kauko-ohjain. Myös kuulokkeiden sotkeutumaton kaapeli on ollut haastavampaa valmistaa kuin aiempien kuulokkeiden ohut sotkeutuva kaapeli. Kompaktin koon tärkeys korostui entisestään nappikuulokkeiden kohdalla, joka on voinut tehdä kuulokkeiden suunnittelusta ja valmistamisesta hieman vaikeampaa, kun on täytynyt tehdä entistä pienempiä kuulokkeita

2010-luvun alussa tapahtui merkittäviä teknisiä kehitysaskelia niin älypuhelimien kuin langattomien yhteyksien kanssa. Tämän myötä kokemuksieni mukaan kuulokkeiden suosio kasvoi entisestään ja langalliset nappikuulokkeet olivat edelleen yleisin kuulokemalli. 2010-luvun alussa langallisten kuulokkeiden rinnalle tuli vartenotettavaksi vaihtoehdoksi langattomat Bluetooth-kuulokkeet, sillä Bluetooth-teknologia oli kehittynyt riittävän nopeaksi, luotettavaksi ja viiveettömäksi. Kokemuksieni mukaan Bluetooth-kuulokkeet olivat aluksi sankakuulokkeita ja joissain laadukkaammissa kuulokkeissa oli myös vastamelutoiminto sekä mikrofoni esimerkiksi puheluita varten. Langattomat Bluetooth-kuulokkeet olivat aluksi varsin kalliita, jonka vuoksi ne eivät olleet heti kaikkien saatavilla. Langalliset nappikuulokkeet olivat edelleen suosittuja, mutta niin langalliset kuin langattomat sankakuulokkeet kasvattivat suosiotaan. Kuulokkeiden suunnittelusta ja valmistamisesta tuli siis 2010-luvun alkupuolella huomattavasti vaikeampaa, sillä kuulokkeista tuli paljon monimutkaisempia laitteita. Bluetooth-teknologian hyödyntämisen lisäksi kuulokkeisiin oli suunniteltava sisäinen akku ja käytettävä latausteknologia. Kuulokkeiden suunnittelussa huomioitiin mielestäni aiempaa tarkemmin kuulokkeiden ergonomia, jotta kuulokkeita oli miellyttävää käyttää pitkiäkin aikoja.

2010-luvun puolivälissä langattomat Bluetooth-kuulokkeet olivat kokemuksieni mukaan jo yleisiä ja sankakuulokkeiden lisäksi langattomien nappikuulokkeiden suosio oli

kasvanut. Langattomien vastamelukuulokkeiden yleistymisen myötä vastamelukuulokkeet levisivät saataville myös edullisempiin hintaluokkiin. Ostin Sonyn korvien ympärille tulevat MDR-ZX770BN-vastamelukuulokkeet 2017 syksyllä. Kuulokkeiden suunnittelussa oli kiinnitetty huomiota ergonomiaan, sillä niitä pystyi pitämään hyvin pidempiäkin yhtäjaksoisia aikoja päässä. Kuulokkeiden suunnittelussa oli huomioitu akun yllättävä loppuminen, sillä kuulokkeissa oli 3.5 mm kuulokeliitäntä, jonka vuoksi kuulokkeita oli mahdollista käyttää langallisesti. Kuulokkeiden suunnittelu oli kiinnitetty myös huomiota vastamelutoiminnon toteuttamiseen, Bluetooth-teknologian hyödyntämiseen ja helppokäyttöisyyteen.

Hankin ensimmäiset TWS-kuulokkeeni Samsung Galaxy Buds -kuulokkeet 2019 syksyllä. Samsung Galaxy Buds -kuulokkeita säilytettiin latauskotelossa, joka niin latasi kuin suojasi TWS-kuulokkeita. Latauskotelo pystyi lataamaan USB-C-liitännän kautta ja langattomalla latauksella. TWS-kuulokkeille oli useita erilaisia silikonisovitteita, joista pystyi valitsemaan itselle parhaiten sopivat, jotta kuulokkeet pysyivät hyvin korvissa. Kuulokkeita pystyi käyttämään yksittäin, jolla pystyi jatkamaan tarvittaessa akunkestoa ja samalla pitämään toisen korvan kuulokkeelta vapaana. TWS-kuulokkeiden nappikuulokkeet olivat fyysiseltä kooltaan suuremmat kuin aikaisemmin käyttämäni nappikuulokkeet, sillä niissä oli elementin lisäksi muun muassa sisäänrakennettu akku ja mikrofoni. Kaikkien tarvittavien komponenttien ja ominaisuuksien saaminen TWS-kuulokkeisiin on vaatinut tarkkaa suunnittelua, sillä kuulokkeet olivat ominaisuuksiinsa nähden hyvin kompaktin kokoiset. Aiempiin Bluetooth-kuulokkeisiin verrattuna TWS-kuulokkeiden Bluetooth-teknologian hyödyntäminen saumattomasti oli vaatinut runsaasti suunnittelua, sillä toinen kuulokkeista yhdistyi toiseen kuulokkeeseen, jotta haluamani ääni kuului molemmissa TWS-kuulokkeissa. Kokemuksieni mukaan TWS-kuulokkeet olivat erinomaiset niin kuuntelu- kuin puhelukäyttöön ja kulkivat kompaktin koon vuoksi helposti mukana.

## 11 JOHTOPÄÄTÖKSET

Käytettäessä langattomia kuulokkeita mobiililaitteilla laitteilla Bluetooth -liitäntä on luontevin valinta Bluetooth -teknologian yleisyyden vuoksi. Langattomat kuulokkeet saavat virtansa akuista, joiden kesto on pidentynyt vuosien saatossa Bluetooth -teknologian kehityttyä entistä vähemmän virtaa kuluttavammaksi. Kuulokkeiden akut voivat tyhjentyä huomaamatta, eikä kuulokkeita ole välttämättä mahdollista ladata juuri sillä hetkellä. Sellaisia hetkiä ajatellen on hienoa, mikäli kuulokkeissa on vaihtoehtoisia liitäntöjä, joiden välityksellä pystyy jatkamaan kuuntelua langallisesti. Usein kuulokkeiden vaihtoehtoisena liitäntäteknologiana toimii 3.5 mm kuulokeliitäntä, joka on toiminut pitkään kuulokeliitännän standardina. 3.5 mm kuulokeliitännän lisäksi osassa kuulokkeista vaihtoehtoisena liitäntäteknologiana toimii USB-C-liitäntä, jonka kautta kuulokkeet latautuvat kuuntelun yhteydessä. On olemassa myös kuulokkeita, joilla voi käyttää kuunteluun niin 3.5 mm kuulokeliitäntää kuin USB-C-liitäntää. (McCuaig 2021)

Liikkuva elämäntapa on osa nykyaikaista elämää ja erilaiset teknologiset ratkaisut ovat siinä tärkeässä roolissa. Mobiililaitteiden, kannettavien tietokoneiden, erilaisten pilvipalveluiden ja kuulokkeiden myötä työskentely on mahdollista mistä paikasta tahansa. Kuulokkeista on tullut viihdekäytön lisäksi myös tärkeä työkalu, jonka avulla esimerkiksi hälyisässä tilassa työskenteleminen ja palaveriin osallistuminen kotiooloissa muita häiritsemättä on mahdollista. Erilaisille käyttötarkoituksille on olemassa niille suunniteltuja kuulokkeita, kuten veden- ja hienkestäviä urheilukuulokkeita. (Bowe 2020)

Kandidaatin- ja diplomityötä tehdessä olen huomannut miten moni tekijä vaikuttaa kuulokkeiden äänenlaatuun ja laatuun yleisesti. Analogisen 3.5 mm kuulokeliitännän luotettava ja helppo toiminta olivat entuudestaan tuttuja, mutta en ollut aiemmin ajatellut miten monta tekijää langallisilla kuulokkeilla kuuntelussakin on. Kandidaatintyössä kirjoitin 3.5 mm kuulokeliitännän suosion jatkuvan audiofiilien joukossa, lisäksi tätä työtä tehdessä olen huomannut 3.5 mm kuulokeliitännän toimivan tulevaisuudessa mobiilivalmistajien keinona erottua toisistaan. (Zahran 2020) Osassa

kuulokkeista on 3.5 mm kuulokeliitännän lisäksi mahdollisuus käyttää USB-C-liitäntää äänilähteenä, jolloin akku latautuu kuuntelun yhteydessä. Langalliset liitäntäteknologiat tuovat siis omalta osaltaan ekologisen näkökulman kuulokkeisiin, sillä kuulokkeet pysyvät käyttökelpoisina myös akun tultua käyttöikänsä loppuun. Normaali ihmiskorva ei pysty erottamaan yli 192kbit/s bittinopeudelle koodatun musiikin ja alkuperäisen analogisen äänen välillä. Tästä syystä normaalikäyttäjällä on järkevintä kiinnittää eniten huomiota, että kuulokkeet ovat mukavat käyttää ja sopivat omiin käyttötarkoituksiin. (Headphonesty 2019a)

Tässä työssä suoritettiin kuulokkeiden keskihintojen hintakehitystutkimus kandidaatintyössäni (Lundbom 2021) tekemieni parannusehdotusten mukaisesti. Hintakehitystutkimuksessa kerättiin kullekin kuulokkeelle neljä hintatietoa jokaista tarkasteluajanjakson vuotta kohti. Runsaampi hintatietojen määrä antoi parempaa kuvaa kuulokkeiden keskihintojen hintakehityksestä ja kuvassa 10 nähtävän kuvan perusteella hinnoissa on nähtävissä melko suurta vaihtelua. Hintakehitystutkimuksen perusteella langallisten nappi- ja sankakuulokkeiden ja langattomien nappikuulokkeiden keskihinnat laskivat tutkimuksen tarkasteluajanjakson aikana. Hintakehitystutkimuksesta oli nähtävissä, että langattomien sankakuulokkeiden keskihinta nousi tarkasteluajanjakson aikana. Mikäli tarkasteluajanjaksoa lyhennettäisiin niin, että kaikkien viiden langattoman sankakuulokkeen hintatietoja olisi koko tarkastelu ajanjaksolta saatavissa, silloin myös langattomien sankakuulokkeiden keskihinta laskisi.

Bluetooth SIG:n mukaan yksilöillä on useampia kuulokkeita, mielestäni valmistajien tulisi pyrkiä tarjoamaan tarvikkeita, kuten Bose QC II Gaming Headsetissa. (Bluetooth SIG 2021a; Fisher 2020a) Tällöin samoja kuulokkeita voisi käyttää esimerkiksi pelikuulokkeina, vastamelukuulokkeina, työkuulokkeina ja viihdekäytössä, jolloin tarve useammille kuulokkeille pienenesi. Tässä työssä esitin idean kuulokkeiden akunvaihtamisesta kuulokkeiden käyttöiän pidentämiseksi, jota on jo tehty Applen ja Podswapin toimesta Yhdysvalloissa. Varsinkin TWS-kuulokkeiden kohdalla niiden pienempien akkujen vaatiman tiheämmän lataussyklin vuoksi sekä sen vuoksi, että TWS-kuulokkeita ei ole mahdollista käyttää langallisina kuulokkeina. TWS-kuulokkeiden ja myös muiden Bluetooth-kuulokkeiden suunnittelussa olisi

tulevaisuudessa hyvä huomioida kuulokkeiden huoltaminen. Esimerkiksi akkujen vaihtaminen olisi käyttöiän pidentämisen lisäksi edullisempaa kuin uusien kuulokkeiden ostaminen sekä ekologinen valinta, joka tuottaisi vähemmän elektronista jätettä. (Villas-Boas 2020; Dragan 2021)

Kuulokkeita voi ladata langallisesti USB-C- ja Lightning-liitäntää hyödyntäen, Lightning-liitäntä on Applen yksinoikeudella käyttämä liitäntäteknologia. Lisäksi kuulokkeita voi ladata langattomasti. Yleisin langattoman latauksen protokolla on Qi. (Susic 2020a) Kuulokkeiden on yleensä tuettava langatonta latausta, jotta langaton lataus on mahdollista. Exeger-yritys on kehittänyt Powerfoyle™-teknologian. Powerfoyle™-teknologia perustuu uudenlaiseen aurinkokennoteknologiaan, joka muuttaa kaikenlaista valoa puhtaaksi energiaksi. Urbanista julkaisi huhtikuussa 2021 Powerfoyle™-teknologiaa hyödyntävät Los Angeles-kuulokkeet, jotka ovat ensimmäiset itsensä lataavat vastamelukuulokkeet. (Cision 2021)

Kuulokkeiden hintakehitystutkimuksessa tehtyjen havaintojen perusteella kullekin kuuloketyypille olisi hyvä tehdä ominaisuusrajaus, jotta keskihintojen kehityksen tutkiminen olisi mahdollisimman hedelmällistä. Lisäksi tutkimuksissa olisi hyvä erottaa Hifi- ja TWS-kuulokkeet erilleen omiksi kuulokeryhmiksi, jotta kuulokkeiden hintakehityksen tarkastelun tuloksista voitaisiin tehdä mahdollisimman hyviä johtopäätöksiä.



## 12 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkitaan kuulokkeiden evoluutiota mobiiliaikaan. Työssä siis perehdytään kuulokkeiden kehittymistä 1800-luvun lopulta nykyiseen mobiiliin aikakauteen. Viimeisen vuoden aikana on eletty poikkeusaikaa, joka on saanut yritykset, oppilaitokset ja muut toimijat sopeuttamaan toimintansa tilanteen mukaiseksi. Etätyöskentely, -palaverit ja -opiskelu ovat mahdollistaneet toimimisen myös poikkeusaikana, toisiin tilanteisiin toimintamalli on sopinut paremmin kuin toisiin. Muutokset toimintamalleissa ovat saaneet pohtimaan toimintaa myös tulevaisuuden kannalta ja seurauksena fyysisten toimistojen tarve on laskenut etätyöpisteiden yleistymisen myötä. Kanssakäymisen tapahtuessa etänä kommunikoiminen on jatkossakin elintärkeässä roolissa myös kasvotusten, joten on tärkeää kuulla selvästi ja myös tulla kuulluksi selkeästi.

Kuulokkeet mahdollistavat selkeän kommunikoimisen etäpalavereiden ja puheluiden aikana. Toimistoilla ja etätyöpisteillä voi olla ulkopuolisia häiriötekijöitä, jotka esimerkiksi kuppikuulokkeet sulkevat melko tehokkaasti. Kuulokkeiden kuppien passiivisen melunpoiston lisäksi useissa kuulokkeissa on aktiivinen vastamelutoiminto, joka hiljentää tehokkaasti toistuvaa matalaa melua. Vastamelutekniikassa hyödynnetään feedback- ja feedforward-algoritmeja ja niiden yhdistelmää, jota kutsutaan hybridiksi. Mikrofonillisilla kuulokkeilla on mahdollista puhua puheluita ilman erillistä mikrofonia, jolloin kuulokkeilla voi niin puhua kuin kuunnella. Kuulokkeet ovat siis hyvät apuvälineet niin toimistolle kuin etätyöpisteelle, sillä niiden avulla voi keskittyä paremmin työhönsä myös meluisissa ympäristöissä. Kuulokkeilla puhuessa puheluilla ei tuota ympäristöön samalla tavalla häiriöääniä kuin kaiutinpuheluilla, joten puhelu tuottaa vähemmän häiriöitä lähellä oleville ihmisille.

Teknologia on nykyään vahvasti läsnä ihmisten jokapäiväisessä elämässä, ja kuulokkeet ovat yksi apuväline niin rentoutumiseen kuin työntekoon. Kuulokkeita on olemassa erilaisiin käyttötarpeisiin ja osa kuulokkeista toimii paremmin toisten laitteiden kanssa kuin muut kuulokkeet. Kuulokkeiden valinnassa on siis syytä ottaa huomioon, että millaisten laitteiden kanssa kuulokkeita on tarkoitus käyttää, jotta kuulokkeet sopivat

omiin käyttötarpeisiin mahdollisimman hyvin. Liikkuvaan elämäntapaan luonnollinen valinta olisi Bluetooth -kuulokkeet, jotka toimivat langattomasti niin mobiililaitteiden kuin tietokoneiden kanssa. Bluetooth-kuulokkeiden kohdalla on tärkeää kiinnittää huomiota, että niin kuulokkeet kuin äänilähteinä toimivat laitteet omaavat samat koodekit, jotta äänenlaatu toimii toivotulla tasolla. Applen mobiililaitteiden ja tietokoneiden kanssa toimii parhaiten Apple -kuulokkeet, sillä Applen valmistamat laitteet osaavat hyödyntää AAC-koodekkia parhaiten ja Applen häviötön ALAC-koodekki toimii vain Applen laitteilla. Mikäli kuulokkeilla on tarkoitus kuunnella säännöllisesti CD-laatuista ääntä korkealaatuisempaa Hi-Res-ääntä, langalliset kuulokkeet voivat olla oikea valinta. Tämä johtuu siitä, että Bluetooth-yhteyden siirtonopeus on rajallinen ja kaikista korkealaatuisin ääni on liian raskasta siirrettäväksi tehokkaasti Bluetooth-yhteydellä.

Kuulokkeiden valinnassa on hyvä huomioida, ettei normaali ihmiskorva pysty erottamaan yli 192kbit/s bittinopeudelle koodattua musiikkia ja alkuperäistä analogista ääntä toisistaan. Normaalikäyttäjällä on kuulokkeita valitessa paras huomioida, että kuulokkeet ovat mahdollisimman ergonomiset käyttää ja sopivat omiin käyttötarkoituksiin ja -olosuhteisiin.

Ekologinen ajattelu on tullut jäädäkseen, esimerkkinä EU:n tahto minimoida tulevaisuudessa latureista tulevaa jätettä standardoimalla latureiden liitäntäteknologia. Yksi askel ekologisempaan suuntaan olisi kullekin käyttötilanteelle ja -tarpeelle olevien kuulokkeiden sijaan pyrkiä hankkimaan yhdet kuulokkeet, joita voisi käyttää halutuissa käyttötilanteissa. Kuulokkeiden käytettävyyttä voisi laajentaa erikseen ostettavalla irrotettavalla mikrofoniilla, kuten Bose on tehnyt QC 35 II Gaming Headset -kuulokkeidensa kohdalla lisätessään irrotettavan pelimoduulin kuulokkeisiinsa. Toisin kuin QC 35 II Gaming Headset -kuulokkeilla, olisi hyvä, mikäli irrotettava mikrofoni toimisi myös langattomassa käytössä. Laadukkaiden kuulokkeiden käyttöikä on laajennettavissa varaosilla, joilla voidaan korvata kuluneita tai hukkuneita osia. Merkittävä muutos langattomien kuulokkeiden käyttöiän kannalta olisi mahdollisuus vaihtaa kuulokkeiden akku, jolloin kuulokkeet kilpailisivat entistä paremmin langallisten kuulokkeiden kanssa.

Yhdysvalloissa Apple on näyttänyt esimerkkiä myymällä palveluna langattomien kuulokkeiden akunvaihtoa vastaavalla tavalla kuin mobiililaitteiden huoltopisteet myyvät palveluna mobiililaitteiden akunvaihtoa. Applen myymän palvelun lisäksi Yhdysvalloissa sijaitseva Podswap vaihtaa Applen AirPods -kuulokkeiden akkuja ja myy kuulokkeiden vaihtopalvelua. Podswap toimittaa kunnostetut kuulokkeet asiakkaille ja asiakkaat toimittavat heille vanhat AirPods -kuulokkeensa. Kuulokkeiden akkujen vaihtaminen on siis mahdollista ja samalla kuulokkeiden akkujen vaihtaminen sopii hyvin nykyaikaiseen ekologiseen ajatteluun.

Akkujen vaihtamisen lisäksi kuulokkeiden käyttöikä voi vaikuttaa valitsemalla kuulokkeet, joita voi käyttää myös langallisesti joko 3.5 mm kuulokeliitännällä tai USB-C-liitännällä tai jopa molemmilla. Tällöin kuulokkeita voi käyttää myös silloin, kun kuulokkeiden akun elinikä on tullut päätökseen. Molemmat edellä mainitut liitännät ovat hyvin laajasti käytettyjä liitäntöjen standardeja sillä erolla, että 3.5 mm kuulokeliitäntä on analoginen ja USB-C-liitäntä on digitaalinen.

Langattomien kuulokkeiden kohdalla akun käyttöikä voi olla kuulokkeiden käyttöiän kannalta merkittävin yksittäinen tekijä. Kuulokkeiden akun käyttöikä pystyy vaikuttamaan omilla käytötavoilla ja -olosuhteilla, parhaimmillaan akku voi olla merkittävästi pitkäikäisempi. Valitsemalla mahdollisimman pitkällä käyttöajalla olevat langattomat kuulokkeet voi pidentää kuulokkeiden akun käyttöikää, sillä mitä pidempi akkujen käyttöaika niin sitä harvemmin kuulokkeita on tarpeen ladata.

Bluetooth SIG:n ennusteiden perusteella LE Audiota tukevien Bluetooth-kuulokkeiden kysyntä tulee tulevaisuudessa olemaan suuri. Toistaiseksi LE Audiota tukevia kuulokkeita ei ole saatavilla, joten tulevaisuudessa olisi mielenkiintoista tutkia LE Audiota tukevia kuulokkeita ja miten ne vertautuvat aiempiin Bluetooth-kuulokkeisiin. Tässä työssä ei perehdytty luujohdekuulokkeisiin niiden muista eroavan teknisen toteutuksen vuoksi. Luujohdekuulokkeet voisivat olla erilaisuutensa vuoksi hyvä tutkimuskohde. TWS-kuulokkeiden ja myös muiden Bluetooth-kuulokkeiden huoltoystävällisempi suunnittelu olisi mielenkiintoinen jatkotutkimuksen kohde.

Työssä perehdyttiin kuulokkeissa hyödynnettävään vastamelutekniikkaan ja sen toteutukseen erilaisia algoritmeja hyödyntäen. Työssä ei tutkittu tarkemmin nykyaikaisten vastamelukuulokkeiden ominaisuuksia ja niiden vastamelutekniikan toteutuksia. Nykyaikaisia vastamelukuulokkeita olisi hyvä tutkia jatkotutkimuksissa.

## LÄHDELUETTELO

Battery University Group, 2017. Article, BU-801b: How to Define Battery Life. [verkkodokumentti]. Vancouver, Battery University Group. Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-801b-how-to-define-battery-life> [viitattu 3.7.2021].

Beacham, F., 2015. Audio, Headphones & Headsets [verkkodokumentti]. Hitchin: The Broadcast Bridge. Saatavissa: <https://www.thebroadcastbridge.com/content/entry/1946/how-a-genius-engineer-designed-the-first-noise-cancelling-headsets> [viitattu 19.1.2021].

Belyi, V. & Gan, W. 2020. A combined bilateral and binaural active noise control algorithm for closed-back headphones. Applied acoustics, 160, s. 107129.

Bluetooth SIG, 2019. Press, Bluetooth Enhances Support for Location Services with New Direction Finding Feature [verkkodokumentti]. Yhdysvallat, Bluetooth SIG. Saatavissa: <https://www.bluetooth.com/press/bluetooth-enhances-support-for-location-services-with-new-direction-finding-feature/> [Viitattu 1.2.2021].

Bluetooth SIG, 2020a. Bluetooth, About us [verkkodokumentti]. Yhdysvallat, Bluetooth SIG. Saatavissa <https://www.bluetooth.com/about-us/> [Viitattu 1.2.2021].

Bluetooth SIG, 2020b. Market research note Assistive Hearables [verkkodokumentti]. Yhdysvallat, Bluetooth SIG. Saatavissa: <https://www.bluetooth.com/wpcontent/uploads/2020/09/MRN-Assistive-Hearables.pdf> [viitattu 1.2.2021]. 12 s.

Bluetooth SIG, 2020c. Technology, LE Audio [verkkodokumentti]. Yhdysvallat, Bluetooth SIG. Saatavissa: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/bluetooth%20technology/le-audio/> [Viitattu 1.2.2021].

Bluetooth SIG, 2021a. Home, Resources. [verkkodokumentti]. Yhdysvallat, Bluetooth SIG. Saatavissa: [https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2021/01/2021-Bluetooth\\_Market\\_Update.pdf](https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2021/01/2021-Bluetooth_Market_Update.pdf) [viitattu 25.4.2021]. 30 s.

Bluetooth SIG, 2021b. Learn about Bluetooth, Recent enhancements. [verkkodokumentti]. Yhdysvallat, Bluetooth SIG. Saatavissa: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/recent-enhancements/le-audio/> [viitattu 28.5.2021].

Bonde, R., Awari, A., Gupta, A., Kadam, A. & Agrawal, R., 2020. Development of Noise Cancellation Device. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 07 (08), S. 4490-4496.

Bose, 2021. Products, Headphones. [verkkodokumentti]. Framingham, Bose. Saatavissa: [https://www.bose.fi/fi\\_fi/products/headphones/headphone\\_accessories.html](https://www.bose.fi/fi_fi/products/headphones/headphone_accessories.html) [viitattu 14.5.2021].

Bowe, T., 2020. Tech, Audio. [verkkodokumentti]. New York, Gear Patrol. Saatavissa: <https://www.gearpatrol.com/tech/audio/a722598/ip-ratings-explained-wireless-earbuds/> [viitattu 3.7.2021].

Bowe, T., 2021. Tech, Audio. [verkkodokumentti]. New York, Gear Patrol. Saatavissa: <https://www.gearpatrol.com/tech/audio/a35472220/how-to-turn-your-favorite-headphones-into-a-gaming-headset/> [viitattu 14.5.2021].

Burns, V. & Roberts, B., 2021. Home, Advice. [verkkodokumentti]. Lontoo, What Hi-Fi?. Saatavissa: <https://www.whathifi.com/advice/high-resolution-audio-everything-you-need-to-know> [viitattu 20.5.2021].

Calabrese, R., 2021. Master, Ultimate guide to audio bitrate & audio formats. [verkkodokumentti]. Australia, Home DJ Studio. Saatavissa: <https://homedjstudio.com/audio-bitrates-formats/> [viitattu 25.5.2021].

Cision, 2021. Urbanista, R. [verkkodokumentti]. Lontoo, Cision. Saatavissa: <https://news.cision.com/urbanista/r/introducing-urbanista-los-angeles--solar-powered-headphones-with-virtually-infinite-playtime,c3340652> [viitattu 21.6.2021].

Connecticut University, 2021. ~Gibson, Notes. [verkkodokumentti]. Connecticut, Connecticut University. Saatavissa: [https://www.phys.uconn.edu/~gibson/Notes/Section5\\_2/Sec5\\_2.htm](https://www.phys.uconn.edu/~gibson/Notes/Section5_2/Sec5_2.htm) [viitattu 30.4.2021].

Daisy, 2021. Home, Video Converter. [verkkodokumentti]. Vancouver, MiniTool. Saatavissa: <https://videoconvert.minitool.com/video-converter/alac-vs-flac.html> [viitattu 25.5.2021].

Das, D., Mohapatra, S., Routray, A. & Basu, T. 2006. Filtered-s LMS algorithm for multichannel active control of nonlinear noise processes. IEEE transactions on audio, speech, and language processing, 14(5), s. 1875-1880.

Dragan, L., 2021. Wirecutter, Blog. [verkkolehti]. New York, Wirecutter. Saatavissa: <https://www.nytimes.com/wirecutter/blog/your-wireless-earbuds-are-trash-eventually/> [viitattu 10.5.2021].

Fisher, C., 2020a. Main, bose-qc35-ii-gaming-headset-150520136. [verkkodokumentti]. Maine, Engadget. Saatavissa: <https://www.engadget.com/bose-qc35-ii-gaming-headset-150520136.html> [viitattu 14.5.2021].

Fisher, T., 2020b. Home Theater & Entertainment, Audio. [verkkodokumentti]. New York, Lifewire. Saatavissa: <https://www.lifewire.com/aptx-bluetooth-codec-4151667> [viitattu 28.5.2021].

Gan, W. & Kuo, S. 2002. An integrated audio and active noise control headset. IEEE transactions on consumer electronics, 48(2), s. 242-247.

Gleeson, A., 2021. 2020, 03. [verkkolehti]. Singapore, Headphonesty Saatavissa: <https://www.headphonesty.com/2020/03/bluetooth-audio-codecs-explained/> [viitattu 25.5.2021].

Guitar Center, 2021. Bose, QC-1-QuietComfort-Headphones [verkkodokumentti]. Westlake Village, Guitar Center. Saatavissa <https://www.guitarcenter.com/Bose/QC-1-QuietComfort-Headphones.gc> [viitattu 19.2.2021].

Guldenschuh, M., Sontacchi, A., Perkmann, M. & Opitz, M. 2012. Assessment of active noise cancelling headphones.

Harju, M., 2021a. Ääni, Äänitekniikan perusteet. [verkkodokumentti] Helsinki, Kallion lukio. Saatavissa: <https://aaltomuoto.wordpress.com/aani/aanitekniikan-perusteet/2-aanen-ominaisuuksia/> [viitattu 24.5.2021].

Harju, M., 2021b. Ääni, Äänisuunnittelu- ja studiotyö. [verkkodokumentti]. Helsinki, Kallion lukio. Saatavissa: <https://aaltomuoto.wordpress.com/aani/aanisuunnittelu-ja-studiotyö/digitaaliaudion-perusteet/> [viitattu 24.5.2021].

Harris, M., 2019. Streaming, Music, Podcasts & Audio. [verkkodokumentti]. New York, Lifewire, Saatavissa: <https://www.lifewire.com/what-does-the-unit-khz-mean-in-digital-music-2438237> [viitattu 25.5.2021].

Headphonesty, 2019a. 2019, 07. [verkkolehti]. Singapore, Headphonesty. Saatavissa: <https://www.headphonesty.com/2019/07/sample-rate-bit-depth-bit-rate/> [viitattu 25.5.2021].

Headphonesty, 2019b. Headphone jacks plugs explained, Headphone Jack and Plugs: Everything You Need to Know [verkkolehti]. Singapore, Headphonesty Saatavissa: <https://www.headphonesty.com/2019/04/headphone-jacks-plugs-explained/> [viitattu 13.5.2021].

Holstad, K., 2020. Get connected, One step closer to Bluetooth LE audio. [verkkodokumentti]. Norja, Get Connected Blog. Saatavissa: <https://blog.nordicsemi.com/getconnected/one-step-closer-to-bluetooth-le-audio> [viitattu 28.5.2021].



Howeth, L.S., 1963. History of Communications-Electronics in The United States Navy. Washington: Yhdysvaltojen hallituksen painotalo, s. 149–150.

ICT Monitor Worldwide, 2020a. Sony Xperia 5 II is a \$950 flagship smartphone with a headphone jack. ICT Monitor Worldwide.

ICT Monitor Worldwide, 2020b. LG V60 ThinQ first look: Affordable 5G phone with practical dual screen system. ICT Monitor Worldwide.

Jawad, A., Nordin, R., Gharghan, S., Jawad, H., Ismail, M. & Abu-AlShaeer, M. 2018. Single-Tube and Multi-Turn Coil Near-Field Wireless Power Transfer for Low-Power Home Appliances. *Energies* (Basel), 11(8), s. 1969.

Jabra, 2021. Software and services, Apps. [verkkodokumentti]. Ballerup, Jabra. Saatavissa: <https://www.jabra.fi/software-and-services/apps/jabra-sound-plus> [viitattu 12.7.2021]

Kashyap, H. 2021. LG Electronics to Wind Up Smartphone Business by July 31. *Voice & Data*.

Katz, L., 2021a. Bluetooth headphones, understanding-bluetooth-codecs-15352. [verkkodokumentti]. Chicago, Soundguys. Saatavissa: <https://www.soundguys.com/understanding-bluetooth-codecs-15352/> [viitattu 24.5.2021].

Katz, L., 2021b. Features, bluetooth-codecs-997074. [verkkodokumentti]. Chicago, Android Authority. Saatavissa: <https://www.androidauthority.com/bluetooth-codecs-997074/> [viitattu 13.5.2021].

Klosek, N. 2018. HEADPHONES HIT THEIR (WIRELESS) STRIDE. *Dealerscope*, 60(11), s. 18–19.

Koss, 2021. Home, History. [verkkodokumentti]. Milwaukee, Koss Corporation. Saatavissa: <https://www.koss.com/history> [viitattu 15.1.2021].

Lee, L., 2021. Home, Press Releases. [verkkodokumentti]. Seoul, Counterpoint Technology Market Research. Saatavissa: <https://www.counterpointresearch.com/global-tws-market-2021/> [viitattu 3.7.2021].

Loeffler, J., 2020. Innovation, Headphones: A History of the Original Wearable Tech. [verkkodokumentti]. Wilmington, Interesting Engineering, Inc. Saatavissa: <https://interestingengineering.com/headphones-a-history-of-the-original-wearable-tech> viitattu [2.6.2021].

LSTN, 2020. Blogs, Main. [verkkodokumentti]. Los Angeles, LSTN. Saatavissa: <https://lstnsound.com/blogs/main/a-brief-history-of-headphones> [viitattu 19.2.2021].

Lundbom, V., 2021. Kuulokkeet ja liitäntäteknologiat. Oulu, Oulun yliopisto. 56 s.

Luo, W., Kuncoro, C. B. D. & Kuan, Y. 2020. Wireless Power Hanger Pad for Portable Wireless Audio Device Power Charger Application. *Energies* (Basel), 13(2), s. 419.

Matija, F., 2019. Home, About Headphones. [verkkodokumentti]. Claymont, HeadphonesAddict. Saatavissa: <https://headphonesaddict.com/sound-quality/> [viitattu 13.5.2021].

Mccarthy, S. 2020. Apple may be forced to abandon its Lightning connection. *University Wire*

McCuaig, V., 2021. Headphones, Reviews. [verkkodokumentti]. Montreal, RTINGS.com. Saatavissa: <https://www.rtings.com/headphones/reviews/best/usb-c-headphones> [viitattu 10.5.2021].

Metsäranta, S. 2020. Akustisen melun vähentäminen vastamelutekniikkaa käyttäen. Tampere, Tampereen ammattikorkeakoulu. 31 s.

Molina, A., 2021. Features, Best music streaming services. [verkkodokumentti]. Kanada, SoundGuys. Saatavissa: <https://www.soundguys.com/best-streaming-services-17247/> [viitattu 12.7.2021]

Moore, S., 2021. Review, Gaming headphones. [verkkodokumentti]. Kanada, SoundGuys. Saatavissa: <https://www.soundguys.com/bose-quietcomfort-35-ii-gaming-headset-review-42353/> [viitattu 14.5.2021].

Peckham, J. 2020. Sony Xperia 1 II Release Date, Price... And The Headphone Jack Is Back. TWICE, 35(3), s. 41-42.

Pinkerton, T., 2014. The opportunist who launched a Market. Dealerscope, 56 (1), s. 50-51.

Podswap, 2021. Apps, Help center. [verkkodokumentti] Florida, Podswap. Saatavissa: <https://www.thepodswap.com/apps/help-center#hc-can-you-fix-other-airpod-issues> [viitattu 10.5.2021].

PR Newswire, 2016. Global Consumer Wired & Wireless Headphones Market - Reducing Number of Smartphone Vendors Packaging Headsets their Products - Research and Markets. PR Newswire.

Prasad, 2021. News, Apple. [verkkodokumentti]. Sofia, GSMArena. Saatavissa: [https://www.gsmarena.com/apple\\_clarifies\\_lossless\\_audio\\_on\\_apple\\_music\\_assures\\_its\\_coming\\_to\\_the\\_homepod-news-49261.php](https://www.gsmarena.com/apple_clarifies_lossless_audio_on_apple_music_assures_its_coming_to_the_homepod-news-49261.php) [viitattu 28.5.2021].

Prisjakt Finland Oy / Hintaopas, 2021. Kuulokkeet, Hintahistoria [verkkodokumentti] Helsinki, Prisjakt Finland Oy / Hintaopas. Saatavissa: <https://hintaopas.fi/c/kuulokkeet> [viitattu 24.3.2021]

Saarelainen, J., 2019. Blogi, Artikkel. [verkkodokumentti]. Tampere, Winled Oy. Saatavissa: <https://www.winled.fi/blogi/artikkeli/Valaistusvoimakkuudet-teollisuudessa-ja-kodin-eri-tiloissa> [viitattu 22.6.2021].

Sagar, 2021. News, Asus. [verkkodokumentti]. Sofia, GSMArena. Saatavissa: [https://www.gsmarena.com/asus\\_zenfone\\_8\\_zenfone\\_8\\_flip\\_specs\\_renders-news-48985.php](https://www.gsmarena.com/asus_zenfone_8_zenfone_8_flip_specs_renders-news-48985.php) [viitattu 8.5.2021].

Samsung, 2020. Support, Mobile devices. [verkkodokumentti]. New Delhi, Samsung. Saatavissa: <https://www.samsung.com/in/support/mobile-devices/what-is-scalable-codec/> [viitattu 25.5.2021].

Siddiqui, A., 2021. XDA, News In Depth. [verkkodokumentti]. Pennsylvania, XDA Developers. Saatavissa: <https://www.xda-developers.com/android-12-bluetooth-le-audio-api/> [viitattu 28.5.2021].

Singal, N. 2016, Jack Out: The 3.5-mm audio jack will be history with new-age smartphones, as USB Type C connectors take over, Living Media India, Limited, New Delhi.

Siswanto, A., Chang, C. & Kuo, S. M. 2020. Multirate Audio-Integrated Feedback Active Noise Control Systems Using Decimated-Band Adaptive Filters for Reducing Narrowband Noises. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(22), s. 6693.

Sony, 2020. Home, hi-res-audio-mp3-cd-sound-quality-comparison. [verkkodokumentti]. Yhdysvallat, Sony Electronics Inc. Saatavissa: <https://electronics.sony.com/hi-res-audio-mp3-cd-sound-quality-comparison> [viitattu 20.5.2021].

Spotify, 2021. Article, Audio quality. [verkkodokumentti]. Tukholma, Spotify. Saatavissa: <https://support.spotify.com/fi/article/audio-quality/> [viitattu 9.5.2021].

Susic, P., 2020a. Home, About Headphones. [verkkodokumentti]. Claymont, HeadphonesAddict. Saatavissa: <https://headphonesaddict.com/fast-charging/> [viitattu 11.6.2021].

Susic, P., 2020b. Home, About Headphones. [verkkodokumentti]. Claymont, HeadphonesAddict. Saatavissa: [https://headphonesaddict.com/everything-about-batteries-in-headphones/#Wireless\\_Earbuds](https://headphonesaddict.com/everything-about-batteries-in-headphones/#Wireless_Earbuds) [viitattu 11.6.2021].

Swaroop, S., 2020. Blogs, Audiophile guide. [verkkodokumentti]. Intia, Headphone Zone. Saatavissa: <https://www.headphonezone.in/blogs/audiophile-guide/evolution-of-headphones> [viitattu 30.6.2021].

Thomas, C., 2021. Post, Do you need a DAC? [verkkodokumentti]. Vancouver, SoundGuys. Saatavissa: <https://www.soundguys.com/do-you-need-a-dac-13488/> [viitattu 9.5.2021].

Triggs, R., 2016. News, 3.5mm audio vs USB Type-C: the good, bad and the future. [verkkodokumentti]. Lontoo, Android Authority. Saatavissa: <https://www.androidauthority.com/3-5mm-audio-usb-type-c-701507/> [viitattu 26.4.2021].

Triggs, R., 2018. Main, usb-audio-explained-18563. [verkkodokumentti]. Lontoo, SoundGuys. Saatavissa: <https://www.soundguys.com/usb-audio-explained-18563/> [viitattu 26.4.2021].

Triggs, R., 2020. Features, audio-compression-explained-29148. [verkkodokumentti]. Lontoo, SoundGuys. Saatavissa: <https://www.soundguys.com/audio-compression-explained-29148/> [viitattu 9.5.2021].

Triggs, R., 2021. Features, aptX Adaptive: The new king of Bluetooth? [verkkodokumentti]. Chicago, Soundguys. Saatavissa: <https://www.soundguys.com/aptx-adaptive-explained-18768/> [viitattu 25.5.2021].

Twice, 2011. Profit Opportunities Abound with Accessories. TWICE: This Week in Consumer Electronics, vol. 26, s. 16.

Vapalahti, L., 2020. Audio Equalization Based on Personal Hearing Data. Helsinki: Aalto-yliopisto, 65 s.

Verkkokauppa.com Oyj, 2021. Audio ja hifi, Nappikuulokkeet [verkkodokumentti]. Helsinki, Verkkokauppa.com Oyj. Saatavissa: <https://www.verkkokauppa.com/fi/catalog/6155c/Nappikuulokkeet/products> [Viitattu 20.5.2021].

Vikberg, H., Lylykangas, K. & De Luca, F., 2019. Päivänvalo-olosuhteiden arviointi- ja ohjausmenetelmät. [verkkodokumentti]. Tallinna: Tallinn University of technology. Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7B9C1BB3E7-4C48-48CA-812A-7EA9A716248B%7D/156355> [viitattu 1.7.2021]. 41 s.

Villas-Boas, A. 2020. The batteries in Apple's \$250 AirPods Pro will eventually die — these are your 2 best options to avoid paying for a new pair every few years. Business Insider.

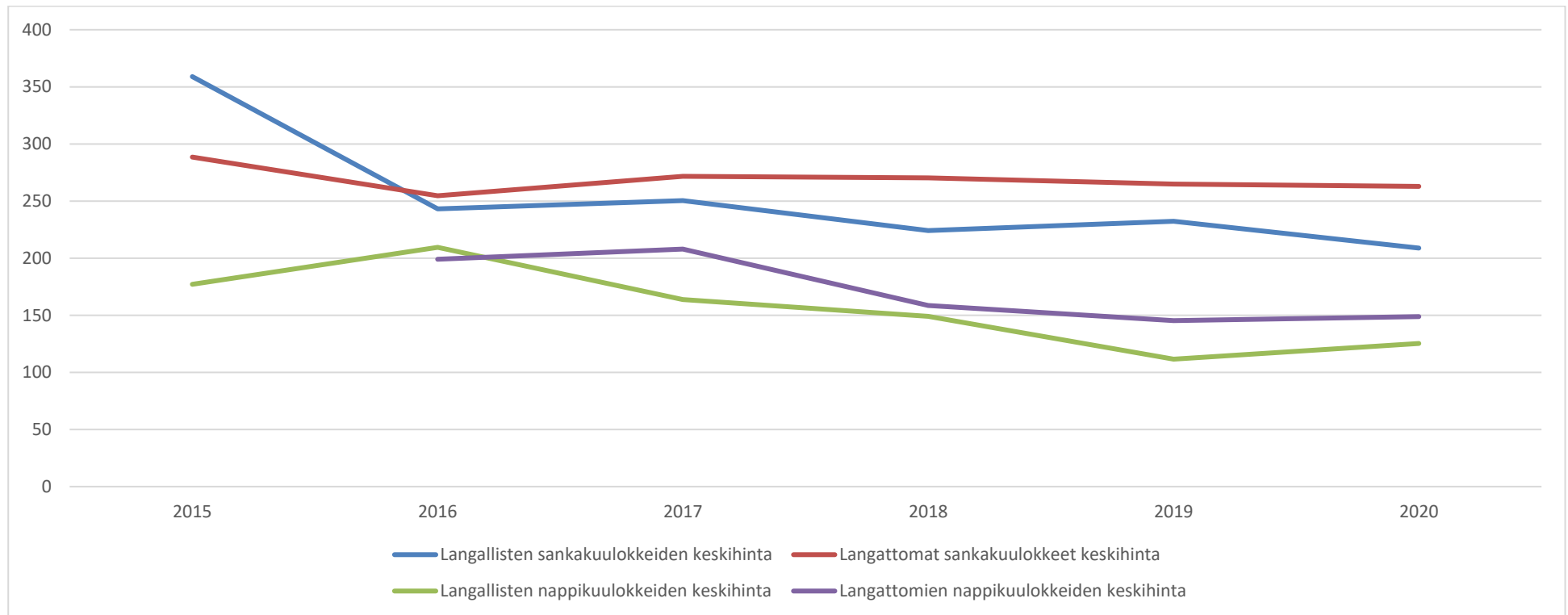
Warren, T., 2021. 2021, 4. [verkkolehti]. Washington, The Verge. Saatavissa: <https://www.theverge.com/2021/4/29/22410088/microsoft-windows-10-bluetooth-aac-support-update> [viitattu 28.5.2021].

Weber, H. 2010. Head Cocoons: A Sensori-Social History of Earphone Use in West Germany, 1950-2010. *The senses & society*, 5(3), s. 339–363.

Wells, G. 2016. The History of Headphones; With Apple removing the headphone jack from its iPhone 7, a look back at the listening device over the years. *The Wall Street journal*. Eastern edition.

Zahran, O., 2020. Home, Plugged In: The Revival of the Headphone Jack. [verkkodokumentti]. Yhdysvallat, Medium. Saatavissa: <https://omarzahran.medium.com/plugged-in-the-revival-of-the-headphone-jack-82a558b94e2c> [viitattu 21.5.2021].

Liite 1. Kuva kuulokkeiden keskihinnosta.



Kuva 11. Kuulokkeiden hintakehitys vuosina 2015–2020. (Lundbom 2021)

## Liite 2. Taulukko kuulokkeiden hintatiedoista

## LIITE 2 (1)

Langalliset sankakuulokkeet	2017 /I	2017 /II	2017/ III	2017/ IV	2018 /I	2018 /II	2018/ III	2018/ IV	2019 /I	2019 /II	2019/ III	2019/ IV	2020 /I	2020 /II	2020/ III	2020/ IV	2021 /I
AKG N60 NC	129	199	197	148	148	79,9	148	148	148	125	125	125	184, 9	199	129	142,8 9	99
AKG K92	57,9	55	48,9	45	38	36	36	36	38,4 4	35	38,44	38,44	40	42	45	45	45
Grado SR80e	169	169	169	169	169	169	129	169	169	169	169	169	169	169	169	169	119
Shure SRH1540	485	465	465	439	498	433	425	429	399	429	429	429	429	425	425	429	427, 8
Grado SR325e	362	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	349
Langattomat sankakuulokkeet																	
AKG Y50 BT	116, 8	113,8	113	129,9	129	119	79	99	99	99	99	129	91,6	91,6	96,9	91,6	99
Sony WH-1000XM3							379	369	328, 86	283	299	239	239	239	206	239	239
AKG N60NC Wireless		298,8	289,5 4	199	239	259	239	169	199	239	239	239	132, 8	198	180,7	138	155, 74
B&W P5 Wireless	299	299	299	239	299	239	259,9 9	269	229	249	259	299	299	299	299	299	299
Bowers & Wilkins PX						399	383,9 9	349	339	299	299	269	269	299	269	399	399

Taulukko 5. Kuulokkeiden hintakehityksen hintatiedot 2017–2021.



## LIITE 2 (2)

Langalliset nappikuulokkeet	2017/I	2017/II	2017/III	2017/IV	2018/I	2018/II	2018/III	2018/IV	2019/I	2019/II	2019/III	2019/IV	2020/I	2020/II	2020/III	2020/IV	2021/I
Sennheiser Momentum M2	74,4	74,4	68,82	69,44	69,44	69,44	59	63,9	61,9	62,99	68,82	68,13	69,9	77,9	77,9	77,9	77,9
SoundMagic E10C	55,8	55,8	45	41,54	41,54	41,54	41,54	39,99	39,99	39,99	39,99	29,98	29,98	41,99	34	17,98	39
Klipsch R6i II													89	89	89	89	89
Shure SE425	227	265	249	220	229	219	229	224	224	215	155	155	155	223	223	174	209
AKG N40	415	399	399	399	399	256,59	249	379	222	222	222	222	412,98	412,98	412,98	412,98	412,98
Langattomat nappikuulokkeet																	
Sony WF-1000X			265,36	248,62	199	169	135,01	185,9	149	99	99	99	87	99	99	99	99
Beyerdynamic Byron BT	199	187	166	189,72	162,44	162,44	159	148,8	128	118,42	117,8	109	109,46	132,68	132,69	182	179
Sony WF-1000XM3											249	169	189,1	197,79	179	169	149
Sennheiser Momentum True Wireless 2													298,84	298,84	298,84	249	192,7
Apple AirPods	158,01	158,01	154	153,76	158,72	165,54	140	148,8	149,99	169,9	186	159	149	129	146,1	159,4	199

Liite 2. Kuulokkeiden hintakehityksen hintatiedot 2017–2021.